Rechnergestützte Messung mechanischer Größen, digitale Signalverarbeitung*

Klaus Eberle

Bei der Durchführung von Messungen dient häufig ein PC als zentrales Hilfsmittel. Ausgerüstet mit zusätzlichen Geräten übernimmt er Aufgaben der Meßwertumformung, der Meßwertverarbeitung und der Ausgabe von Signalen zur Steuerung von Versuchsabläufen. Die Erfassung („Sammeln“ und „Aufbewahren“) von Meßwerten durch einen Rechner bedingt, daß die als proportionale elektrische Spannungen vorliegenden mechanischen Größen digitalisiert werden. Dazu dienen Analog/Digital Wandler, die in einem wählbaren Zeittakt den kontinuierlichen Verlauf der Spannungen in eine Tabelle zeitdiskreter Werte überführen. Bei der Ausgabe von Steuersignalen kommt das komplementäre Gerät zum Einsatz, ein Digital/Analog Wandler, der aus einer numerischen Stützwerttabelle ein zeitlich kontinuierliches, elektrisches Signal erzeugt.

Bei der Messung zeitabhängiger Größen können jedoch Fehler auftreten, die einerseits im Prinzip der Digitalisierung analoger Meßwertsignale begründet sind und andererseits bei der Anwendung numerischer Methoden entstehen. Um diese Fehler zu vermeiden bedarf es genauerer Kenntnisse bezüglich Geräte und Auswerteverfahren .

Aufbauend auf die Vorlesung VERSUCHSTECHNIK behandelt diese Lehrveranstaltung erweiterte Meß- und Analysemethoden im Bereich der Strukturuntersuchungen und demonstriert ihren Einsatz mittels praktischer Übungen. Damit folgt sie zwei Zielsetzungen:

1. Vermittlung von Kenntnissen über Datenerfassung, Datenanalyse und Versuchssteuerung mittels PC

2. Praktische Anwendung der rechnergestützten Versuchs- und Meßtechnik zur Gewinnung von Ergebnissen, die zuverlässig und fehlerminimal sind.

* 7.Semester, SS, 2 SWS, Vertiefung, Wahlfach, mündliche Prüfung

eberle@isd.uni-stuttgart.de, Tel 685-3652, Versuchshalle

INHALT

1 EINFÜHRUNG 1-2

1.1 ÜBERBLICK 1-3
1.2 SCHEMA VERSUCHSABLAUF 1-4

2 MEßWERTERFASSUNG MITTELS PC 2-6

2.1 HARDWARE 2-7
2.1.1 Meßwerterfassungskarten 2-7
2.1.2 Multifunktionskarte 2-8
2.1.3 Intelligente PC-Karte 2-9
2.1.4 Zeitgleiche Erfassung 2-10
2.1.5 Signalanpassung 2-11
2.2 SOFTWARE 2-12
2.2.1 Betriebssystem 2-12
2.2.2 Softwarepakete 2-13
2.2.3 Programmierung 2-17
2.3 SPEICHERUNG, DATENREDUKTION 2-17
2.3.1 Speicherung 2-18
2.3.2 Datenreduktion durch Triggerung 2-20

3 MESSWERTANALYSE 3-21

3.1 ZIELE, AUFGABEN 3-21
3.2 MITTELWERTBILDUNG 3-23
3.3 KURVENANPASSUNG 3-25
3.3.1 Das Prinzip der kleinsten Quadrate 3-26
3.3.2 Orthogonalität 3-27
3.3.3 Fourier-Reihe 3-27
3.3.4 Fehlerbewertung, Güte der Anpassung 3-27
3.3.4.1 Korrelationskoeffizient 3-28
3.3.4.2 Anpassungstests 3-28
3.4 HARMONISCHE ANALYSE IM ZEITBEREICH 3-29
3.4.1 Parameter harmonischer Signale (DIN 1311) 3-29
3.4.2 Ermittlung der Parameter gestörter Signale 3-31
3.5 FREQUENZANALYSE 3-33
3.5.1 Fourier-Transformation 3-33
3.5.2 Diskrete Fourier-Transformation 3-34
3.5.3 Abschneideeffekt 3-35
3.5.4 Fensterung 3-36
3.5.5 Übertragungsfunktion und Faltung 3-37
3.5.6 Korrelationsfunktionen, Spektraldichtefunktionen 3-38
3.5.7 Mittelwertbildung 3-39
3.6 FILTERUNG 3-41
3.6.1 Filterwirkung 3-41
3.6.2 Lineare digitale Filter 3-42
3.6.3 Filterantwortfunktionen 3-44
3.6.4 Filtertypen, Filterentwurf 3-45

4 RECHNERGESTÜTZTE VERSUCHE 4-47

4.1 GRUNDSÄTZLICHE BEMERKUNGEN 4-47
4.2 KALIBRIERUNG 4-48
4.3 TYPISCHE MESSAUFGABEN 4-48
4.4 ELEMENTE UND FUNKTIONSEINHEITEN RECHNERGESTEUERTER VERSUCHE 4-50

1 Einführung

1.1 Überblick

Die Meßtechnik dient als Teil der Versuchstechnik dem Ziel, Eigenschaften von elastomechanischen Systemen, von Bauteilen oder Probekörpern experimentell zu ermitteln. Dabei werden die Reaktionen eines Versuchsobjektes (Spannungen, Dehnungen, Verformungen, Bewegungen) bei bekannten oder definiert erzeugten Einwirkungen (Kräfte, Verformungen, Temperatur, Feuchtigkeit) gemessen. Die Verknüpfung von Reaktionen und Einwirkungen führt dann zu den Eigenschaften des Objektes.

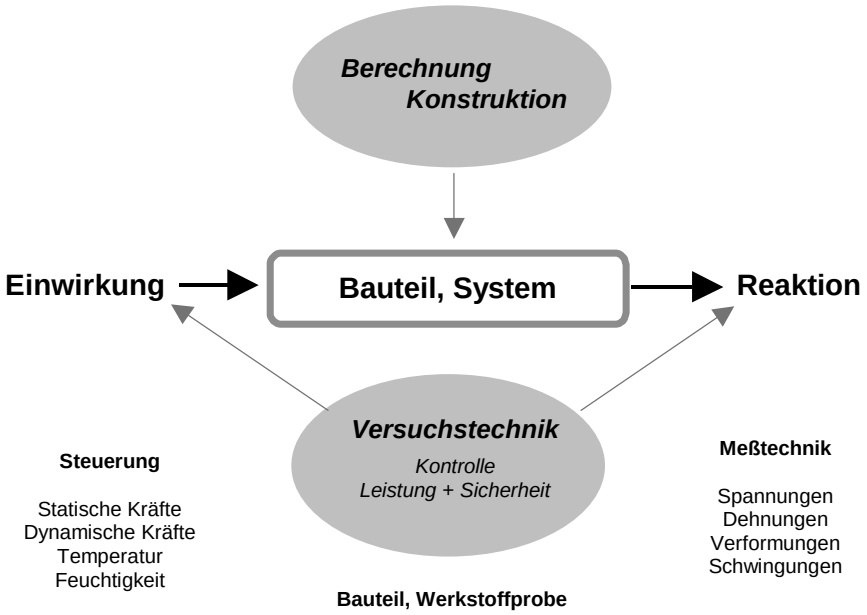


Bild 1.1-1 Messen in der Versuchstechnik

Bei der Durchführung von Messungen ist „der Rechner“ das zentrale Hilfsmittel. Ausgerüstet mit zusätzlichen Geräten übernimmt er Aufgaben der Meßwertumformung, der Meßwertverarbeitung und der Ausgabe von Signalen zur Steuerung von Versuchsabläufen. Die Erfassung („Sammeln“ und „Aufbewahren“) von Meßwerten durch einen Rechner bedingt, daß die als proportionale elektrische Spannungen vorliegenden mechanischen Größen digitalisiert werden. Dazu dienen Analog/Digital Wandler, die in einem wählbaren Zeittakt den kontinuierlichen Verlauf der Spannungen in eine Tabelle zeitdiskreter Werte überführen. Bei der Ausgabe von Steuersignalen kommt das komplementäre Gerät zum Einsatz, ein Digital/Analog Wandler, das aus einer numerischen Stützwerttabelle ein zeitlich kontinuierliches, elektrisches Signal erzeugt.

Die rechnergestützte Meßtechnik hat auf Grund zahlreicher Vorteile die „analogen“, also nicht-digitalen Methoden, weitgehend abgelöst:

- Eine große Zahl von Meßgrößen kann über lange Zeiträume erfaßt und gespeichert werden
- Für die Analyse von Meßwerten stehen umfangreiche Bibliotheken mit mathematischen Funktionen zur Verfügung
- Die Eigenschaften eines Objektes lassen sich einfach und anschaulich visualisieren
- Durch wiederholte Datenerfassung ist die Zuverlässigkeit von Messungen zu belegen und ihre Genauigkeit zu steigern
- Die Kalibrierung einer Meßkette ist einfach und kann dementsprechend oft wiederholt werden

Andererseits beinhaltet die Methodik Fehlermöglichkeiten, die im Prinzip der Digitalisierung begründet sind. Sie zu vermeiden oder ihre Auswirkungen zu minimieren, bedarf es solider Kenntnisse über die Wirkungen von Geräteparametern und Softwareoptionen.

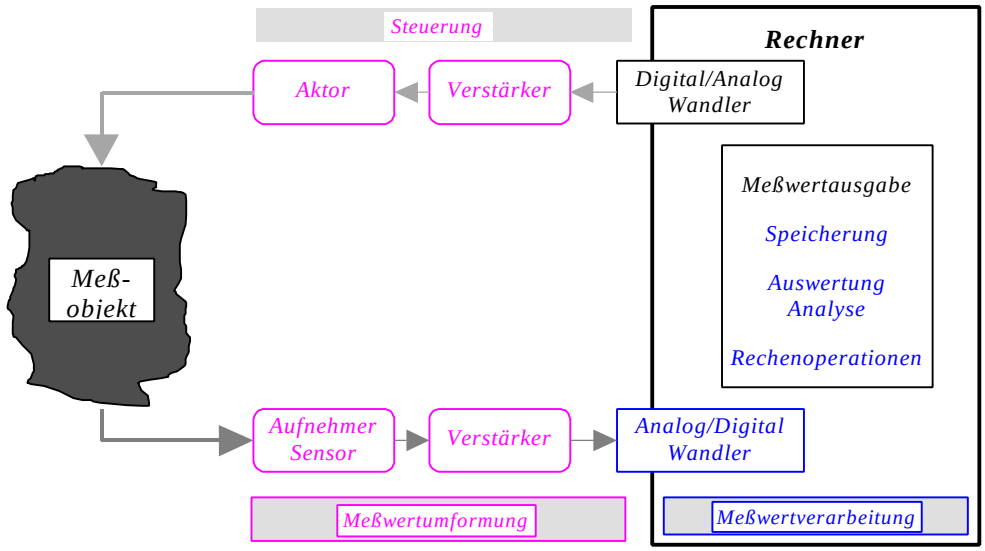


Bild 1.1-2 Rechnergestützte Versuchstechnik

1.2 Schema Versuchsablauf

Bild 1.2-1 zeigt ein Schema mit den wesentlichen Merkmalen eines Versuchsablaufs: Vorbereitung (1-3), Durchführung (4-6), Kontrolle gespeicherter Daten (7) und Auswertung und Präsentation der Ergebnisse (8). In den einzelnen Abschnitten erfüllt der Rechner sehr unterschiedliche Anforderungen, für die geeignete Programme zur Verfügung stehen müssen. Ein handelsüblicher Rechner wird erst durch den Einbau von sogenannten Meßwerterfassungskarten in die Lage versetzt, Meßwerterfassungs- und Steuerungsaufgaben zu übernehmen. Die zum Betrieb dieser Geräte notwendigen Programme gehören meistens zum Lieferumfang und ermöglichen dem Benutzer, durch Eingabe von Parametern den Versuchsablauf zu programmieren.

	Funktion	Erläuterung
1	**Parametereingabe**	Schalter, Auswahltabelle, Eingabe Zahlenwerte,
2	**Abgleicharbeiten**	Verstärker-Einstellungen, Kalibrierung
3	**Funktionskontrolle**	Meßstellenreaktion, Signalqualität
4	**Versuch starten**	Ausgabe von Steuersignalen (Sollwerte) Meßwerterfassung
5	**Versuch beobachten**	Zwischenwerte anzeigen, Grenzwertüberwachung, Datenreduktion (Mittelung), Unterbrechung, fortlaufende Speicherung
6	**Versuch beenden**	Entlastung, Datenspeicherung
7	**Kontrolle gespeicherter Meßwerte**	Darstellung:Oszilloskop-Funktion Markierung: einfache Auswertungen
8	**Auswertung**	Analyse von gespeicherten Daten zusammenfassende Auswertung und Darstellung

Bild 1.2-1 Schema einer Versuchsdurchführung

Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Themen stellen nur einen Ausschnitt des umfangreichen Gebietes der rechnergestützen Versuchstechnik dar. Sie beschränken sich auf meßtechnische Aspekte und erläutern die in der Praxis angewandten Methoden anhand einfacher Beispiele. Die Gestaltung des Manuskripts folgt der Intention, wichtigte Punkte zusammenfassend und knapp zu erläutern. Bezüglich der theoretischen Grundlagen und der mathematischen Ableitungen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Literatur

***Schumny, H**.(Hrsg.):* Personal Computer in Labor, Versuchs- und Prüffeld. 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1990

***Stearns, S.D**.*: Digitale Verarbeitung analoger Signale Oldenbourg Verlag 1988

***Sachs, L**.:* Statistische Methoden. 4.Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1979

***Bevington P.R**.:* Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciencies. McGraw-Hill Book Company New York, 1969

***Brigham, E.O**.:* FFT Schnelle Fourier-Transformation. 3.Auflage, Oldenbourg Verlag, München 1987

***Bendat, J.S., Piersol, A.G**.:*
Random Data:Analysis and Measurement Procedures. John Wiley & Sons, New York 1971

***Bendat, J.S., Piersol, A.G**.:*
Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. John Wiley & Sons, New York 1980

Azizi, S.A.: Entwurf und Realisierung digitaler Filter. Oldenbourg Verlag 1990

***Natke, H.G**.:* Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Vieweg, Wiesbaden 1983

Press, W.H. Numerical Recipes in C. Cambridge University Press, Cambridge 1988

Normen: DIN 1301: Einheiten; DIN 1304: Allgemeine Formelzeichen; DIN 1319: Grundbegriffe der Meßtechnik;

Sorcus Computer GmbH:
Benutzerhandbuch MODULAR-4/486, Heidelberg 1994

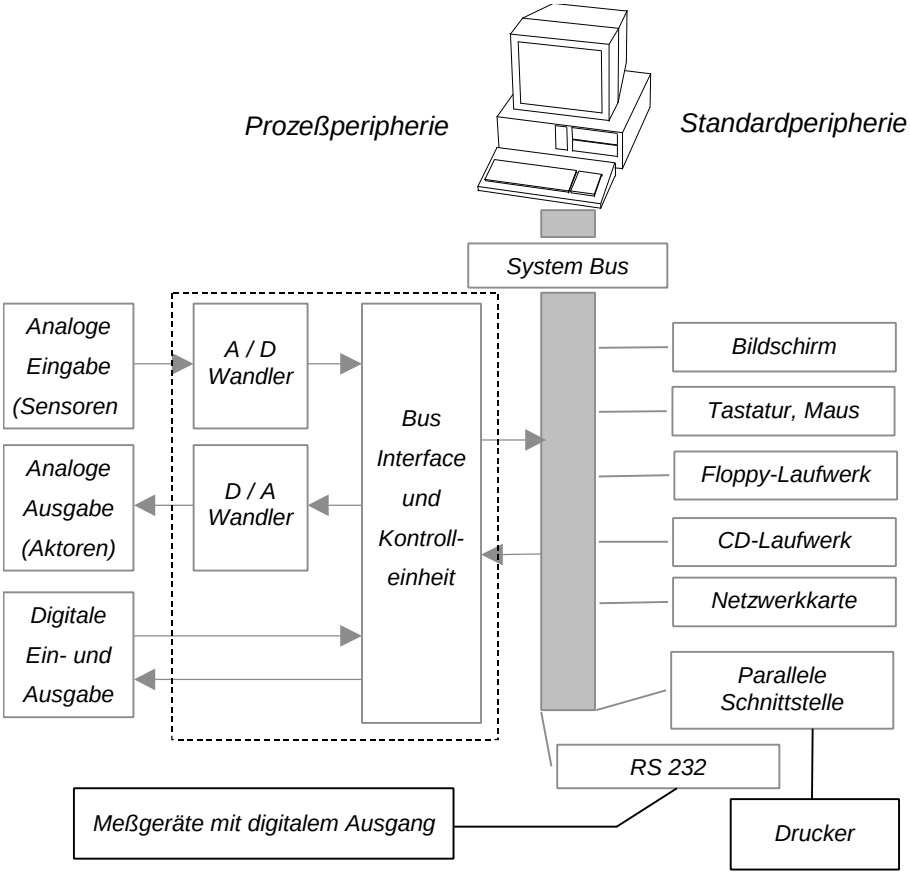
***Burr-Brown** Corporation (Hrsg.):*
The Handbook of Personal Computer Instrumentation. Fifth Edition, 1990

***Dubbel, H**.:* Taschenbuch für den Maschinenbau. 15.Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1986

2 Meßwerterfassung mittels PC

Handelsübliche Personal Computer sind als Meßrechner einsetzbar, wenn ihre standardmäßigen Periphergeräte wie Bildschirm, Tastatur, Laufwerke etc. durch spezielle Prozeßperipherie erweitert werden. Unter diesem Begriff sind Einsteckkarten zu verstehen, welche die Aufgaben der Abtastung, Digitalisierung und Übertragung von Meßwerten in den Halbleiterspeicher des Rechners erfüllen. Sie stellen das Bindeglied zwischen analoger Spannung am Ausgang von Sensoren und einer Tabelle von Momentanwerten im Rechner dar.

Das Schema in Bild 2-1 zeigt die wesentlichen Komponenten einer PC-basierten Meßstation, die über den AT-Bus des Rechners mit einander in Verbindung stehen und gesteuert werden.



Typische Datenübertragungsraten:

(Bit)serielle Schnittstelle	RS -232-C	19,2 kBit/s
(Bit)parallele Schnittstelle (8 Bit)	IEEE-488	1 Mbyte/s
DMA (Direct Memory Access)	360 kBytes/s	Throughput
(direkter Speicherzugriff auf periphere Initiative)	1 Mbyte/s	Burstmode

(Stand 1998)

Bild 2-1 Schema einer Meßstation auf PC-Basis

In der Kommunikation zwischen Zentralrechner und peripheren Geräten sind drei Arbeitsweisen von grundlegender Bedeutung:

Zyklische Abfrage *(Polling*) ist die übliche Methode, viele an den Rechner angeschlossene Teilnehmer auf ihren Zustand hin abzufragen. Weil Polling durch Software realisiert wird, kann bei umfangreichen Systemen die Zykluszeit für die Abfrage eines Analogeingangs Sekunden betragen.

Direkter Speicherzugriff *(DMA, Direct Memory Access)* ist eine viel schnellere Methode, die mit Hardware arbeitet. Dabei werden Daten direkt, ohne den Zentralprozessor zu benutzen und mit höchster Geschwindigkeit in den Arbeitsspeicher geladen oder daraus entnommen.

Alarmverarbeitung *(Interrupt handling)* ist die Voraussetzung, um auf spontan auftretende Ereignisse sofort reagieren zu können *(Realzeitverarbeitung).* Die dazu notwendige Unterbrechungssteuerung veranlaßt den Zentralprozessor nach einer peripher initiierten Meldung *(SRQ, Service Request),* die gerade laufende Aktion definiert zu unterbrechen, den Melder zu bedienen (Interrupt Service) und danach exakt in das unterbrochene Programm zurückzukehren.

Die Auslösung einer Datenübertragungen erfolgt entweder durch zentrale Initiative, bei der der Prozessor eine periphere Einheit auffordert, Daten zu senden. Oder eine periphere Einheit meldet dem Prozessor, daß sie Daten übernehmen oder zur Verfügung stellen möchte.

Die Datenübertragung zwischen Zentralprozessor und peripheren Geräten basiert auf zwei Informationsformen:

Binärinformation, einzelne Bits, die z.B. Schalterstellungen oder Grenzwerte darstellen
Wortinformationen, Binärwörter, die aus 8, 12, 16 oder 32 (2^n) Bits bestehen

Unter dem im Bild 2-1 verwendeten Begriff Prozeßperipherie sind die Geräte angeordnet, die zum Beispiel in Form von Einsteckkarten den üblichen PC zur Meßstation erweitern. Ohne Einsteckkarten lassen sich Meßwerte nur erfassen, wenn externe Meßgeräte (Digitalvoltmeter, Frequenzzähler, DMS-Verstärker) mit einem eigenen Digitalausgang an eine der standardmäßigen Schnittstellen des Rechners anzuschließen sind. Im Vergleich zu den einsteckbaren Meßwerterfassungskarten ist aber die Datenübertragungsrate gering und die Anwendung dieser Meßtechnik auf Vorgänge mit geringen Änderungsgeschwindigkeiten begrenzt.

Im Bereich der Erfassung schneller, dynamischer Signale (Schwingungen, Impulse) gibt es zwei prinzipielle Grenzen: Abtastzeit und Speicherplatz. Zur Vermeidung von systematischen Fehlern muß die Abtastzeit *mindestens* das Zweifache der höchsten Signalfrequenz betragen (Shannonsches Abtasttheorem). Die Aufzeichnung langer Signale setzt entsprechenden großen Speicherplatz voraus, wie er in gängigen PCs serienmäßig eingebaut ist. Die Grenzen der Erfassung werden dabei einerseits durch die spezifizierte Geschwindigkeit der Erfassungskarte und ihrer elektronischen Komponenten bestimmt. Meistens ist jedoch die wirkliche Transfergeschwindigkeit die kritische Größe, welche die Übergabe der Daten in den Rechner kennzeichnet. Sie ist von der Rechnerarchitektur und nicht zuletzt von der Effizienz der angewandten Software abhängig.

In diesem Zusammenhang sind zwei grundlegende Begriffe zu erläutern, welche die Problematik verdeutlichen: *On-line*- und *Off-line*-Meßwerterfassung.

One-line bedeutet, daß die digitalisierten Meßwerte direkt in den Rechner übertragen und sofort verarbeitet (analysiert, visualisiert) werden.

Off-line bezeichnet die Methode, die Daten zunächst in einem rechnerinternen oder externen Speichermedium (Halbleiter, Magnetplatte, Diskette) abzulegen. Für die weitere Verarbeitung werden nach Abschluß der Messung die Daten in einem gesonderten Arbeitsgang in den Rechner übertragen.

Ob Meßstation *off-line* oder *one-line* arbeitet, hängt von der Gewichtung der Anforderungen ab: Messungen mit hohen Abtastraten und großen Datenströmen erlauben im allgemeinen keine unmittelbaren Auswertungen und Anzeigen. Im Extremfall müssen gesonderte Geräte eingesetzt werden, die sogenannten *Transientenrecorder*, deren spezielle Leistungsmerkmale diejenigen universeller Einsteckkarten weit übertreffen.

2.1 Hardware

2.1.1 Meßwerterfassungskarten

Für die Ausrüstung eines PC zur Meßstation gibt es eine Vielzahl von Herstellern mit einem breiten Angebot von Einsteckkarten und Meßsystemen. Obwohl dieser Markt sich rasch wandelt und ständig neue Produkte mit verbesserten Leistungsdaten angeboten werden, bleiben Architektur und Funktionalität im wesentlichen die gleichen.

Zwei Typen von Einsteckkarten stehen zur Verfügung: Passive oder aktive Karten

Passive Karten, deren Ansteuerung und Kontrolle die intensive Mitarbeiter des PCs erfordert (Bild 2.1-1)

„Aktive" oder „intelligente" Karten mit einem eigenen Mikro- oder Subprozessor (z.B. Signalprozessor). Sie können eine Meßaufgabe unabhängig durchführen und beanspruchen den „gastgebenden" Rechner (Host) nur für kurze Zeiträume.

Passive Karten sind zwar billiger und einfacher zu handhaben, aber sie eignen sich nur begrenzt für den *Online*-Betrieb. Intelligente Karten (Bild 2.1-2) eröffnen viele Möglichkeiten, die Aufgaben der Meßwerterfassung und Meßwertverarbeitung zwischen dem Haupt- und Subrechner aufzuteilen und einen (Parallel-)Betrieb zu organisieren, der dem Benutzer schon während des Meßvorgangs Ergebnisse zur Verfügung stellt (*realtime, just in time*). Dieser Kartentyp ist teuerer und verlangt auch mehr Arbeit bei der Vorbereitung von Messungen. Vor allem bei komplexen Anordnungen, beispielsweise bei Versuchsteuerung *und* Messung, oder bei Regelungsaufgaben, muß das Programm für den Subprozessor vom Benutzer selbst erstellt werden. Dazu sind dann Kenntnisse von Prozessorarchitektur und einschlägigen Programmiersprachen (Assembler, C) erforderlich.

2.1.2 Multifunktionskarte

Bild 2.1-1 zeigt das Blockschaltbild einer passiven Karte. Hersteller: Advantech; Karte: LabCard PCL-812PG Multifunktionskarte.

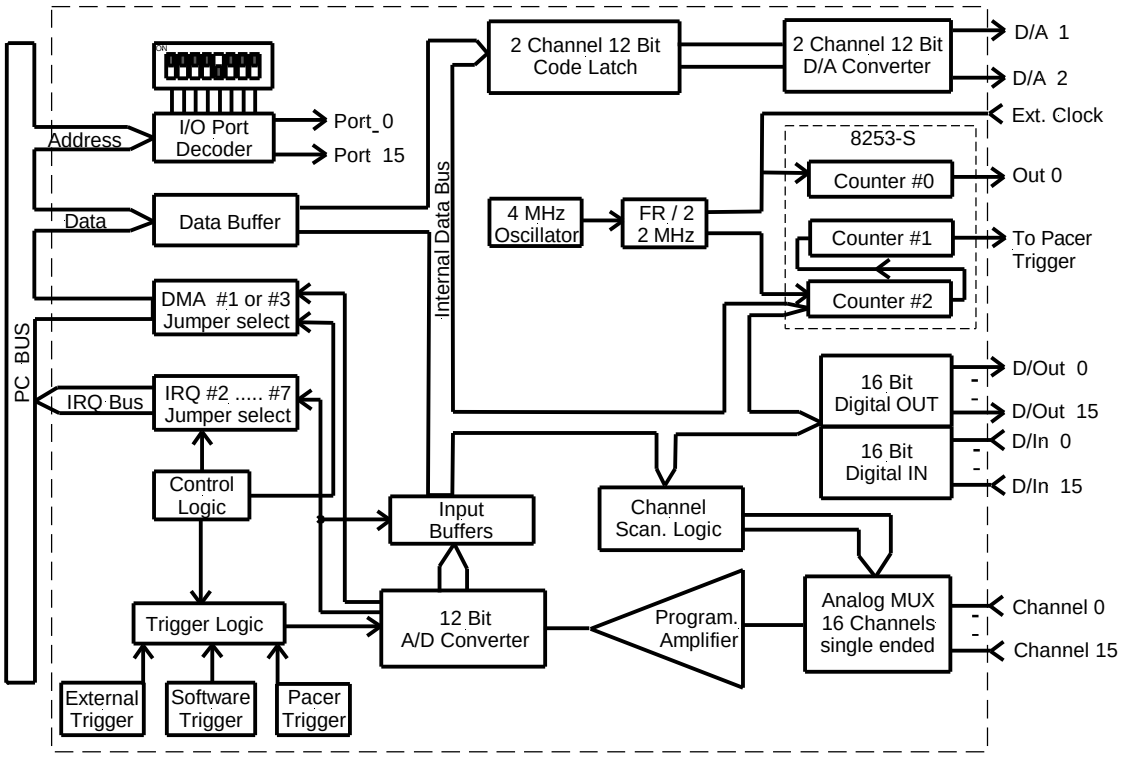


Bild 2.1-1 Blockschaltbild der Meßwerterfassungskarte PCL-812PG

Am Beispiel dieses Aufbaus sollen die wichtigsten Elemente und Funktionen einer Meßwerterfassungskarte beschrieben werden.

Analoge Eingänge (A/D-Wandlung)

16 Kanäle
Auflösung 12 Bit, maximal 30 kHz Abtastfrequenz
Programmierbare Eingangsbereiche. ±10V; ±5V; ±2.5; ... ±0.3125V
Trigger: Software, Timer Chip, extern

Sensoren am Meßobjekt wandeln die zu messenden mechanischen Größen in proportionale elektrische Spannungen um. Um diese „analogen", das heißt zeit- und wertkontinuierlichen Signale im Rechner verarbeiten zu können, müssen sie in Zeitreihen, also zeit- und wertdiskrete Signale überführt werden. Diese Aufgabe obliegt dem **A**nalog/**D**igital-Wandler, dessen Auflösung von der Wortlänge abhängt: Die größte mit 12 Bit darstellbare Zahl ist $2^{12} = 4096$, die der maximal zulässigen Eingangsspannung von 10V entspricht. Damit ist die „Auflösung", der kleinste mit 1 Bit darstellbare Spannungswert 10/4096 = 0.00244 Volt. Die Abtastfrequenz von 30 kHz besagt, daß höchstens 30000 digitale Werte pro Sekunde zu erhalten sind, womit das kleinste Zeitintervall 33.3 µs beträgt.

Die Abtastung von mehr als einem Eingangskanal gelingt mit einem Multiplexer, einem elektronischen Umschalter, der die gewählten Eingänge nacheinander dem A/D-Wandler zuführt. Er verursacht damit eine konstante Verschiebung der Zeitpunkte, an denen die jeweiligen Kanalwerte erfaßt werden.

Der programmierbare Verstärker vor dem A/D-Wandler ist von Vorteil, wenn die maximale Ausgangsspannung des angeschlossenen Sensors sehr klein ist und nur mit wenigen Bits zu digitalisieren wäre. Durch die dem Signal angepaßte Verstärkung läßt sich eine höhere Auflösung erzielen und die Genauigkeit der Messung steigern.

Die Triggerung bestimmt den Start der Wandlung, die im allgemeinen nicht mit dem Start des Meßprogramms, sondern zu einem vom Benutzer definierten Zeitpunkt erfolgen soll. Die Triggerbedingungen können dabei per Software vorgegeben, von einem Zeitbaustein (Timer Chip) abgeleitet, oder durch eine externe Leitung zugeführt werden.

Analoge Ausgänge (D/A-Wandlung)
2 Kanäle
Auflösung 12 Bit, 0 ... 5 V, 0 ... 10V

Analoge Ausgänge dienen zur Steuerung oder Regelung von Versuchen. Sie werden im **D**igital/**A**nalog-Wandler erzeugt und basieren auf einer im Rechner vorhandenen Wertetabelle, die mit konstantem Ausgabetakt (Settling time) an den Ausgangsbuchsen anliegt. Die Ausgangsspannung ist zwar zeitkontinuierlich, trägt aber noch wertdiskrete Eigenschaften, die bei niedrigen Signalfrequenzen einen treppenförmigen Signalverlauf verursachen. Dieser Effekt ist im allgemeinen unbedeutend, er kann aber durch zusätzliche elektronische Komponenten (Rekonstruktionsfilter) beseitigt werden.

Digitale Ein-und Ausgänge
16 digitale Eingänge
16 digitale Ausgänge

Diese Ein- und Ausgänge können zwei digitale Zustände empfangen oder ausgeben, nämlich 0 oder 1 in Form von Spannungswerten mit 0 oder 5 V. Damit lassen sich zum Beispiel Schalterstellungen (An-Aus) oder Grenzwertmelder (unter dem Limit - über dem Limit) abfragen oder durch Ausgabe von Spannungen externe Schalter betätigen und Warnlampen schalten. Diese Möglichkeiten sind für die Konzeption von umfangreichen Meßaufgaben und Versuchsteuerungen von Vorteil, bei denen keine ständige Zustandsanzeige auf dem Bildschirm des Rechners erfolgen soll.

Zähler
3 Kanäle, 16 Bit

Mit diesen Bausteinen lassen sich digitale Ereignisse zählen und Häufigkeiten oder Frequenzen ermitteln: Schaltvorgänge, Schwingspiele, Taktfrequenzen. Der hier benutze Baustein INTEL 8253 ist ein kombinierter Zeitgeber/Zähler, der entsprechend seiner Programmierung in einer von sechs verschiedenen Betriebsarten arbeiten kann, zum Beispiel die Erzeugung von A/D Triggerpulse und von Rechteckfunktionen.

DMA- und Interupttransfer

Die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen Rechner und Karte erfolgt per Programm, per Interrupt oder mittels DMA-Transfer. Welche dieser Möglichkeit genutzt wird, hängt von der Meßaufgabe ab und wird bei der Programmierung festgelegt.

2.1.3 Intelligente PC-Karte

Die Merkmale einer intelligenten Einsteckkarte werden an einem Beispiel erläutert. Die Karte mit der Bezeichnung MODULAR-4/486 (Fa.Sorcus Computer GmbH, Aufbau Bild 2.1-2) enthält einen kompletten Prozessor (486 bzw.586 CPU). Sie kann unabhängig vom PC arbeiten, so daß eine echte Parallelverarbeitung (durch bis zu 8 Karten in einem PC) möglich ist. Die „Karte“ besteht eigentlich aus einer Basiskarte und aufsteckbaren Funktionsmodulen. Die Basiskarte ist bereits mit umfangreicher Peripherie ausgestattet: EPROM, statisches CMOS-RAM (bis zu 4 Mbyte), Spannungsüberwachung, Timer, serielle Schnittstellen. Durch 4 aufsteckbare Module kann die Karte an beliebige Meß-, Steuer- und Regelungsaufgaben angepaßt werden. Ca 50 verschiedene Modultypen sind verfügbar, darunter digitale und analoge Ein- und Ausgänge, Zähler, Inkrementalgeberinterface, serielle Schnittstellen.

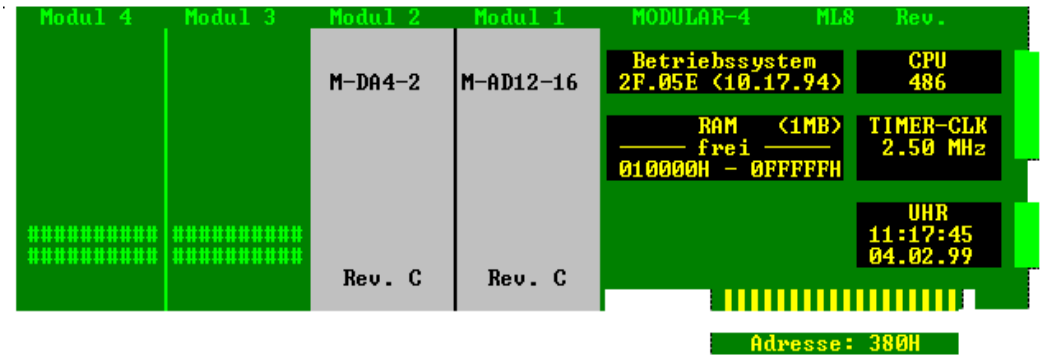


Bild 2.1-2 Aufbau der Karte MODULAR-4/486

Die Funktionen der Module gleichen denen auf einer passiven Karte. Im Beispiel ist Modul 1 ein A/D-Wandler mit 16 analogen Eingängen und programmierbaren Vorverstärkern, Modul 2 ein D/A-Wandler mit zwei analogen Ausgängen. Ihre Ansteuerung und der Datenaustausch erfolgt durch die CPU der Basiskarte ohne direkte Mitarbeit des gastgebenden PCs. Die Kommunikation mit ihm richtet sich ausschließlich nach Gesichtspunkten der Zweckmäßigkeit. Je nach Art der Aufgabe beschränkt sie sich auf die Initialisierung der Karte, verbunden mit dem Starten des Programms und auf die Übernahme der Daten am Ende. In anderen Fällen sind Datentransfers während des Versuchsablaufs notwendig, um Zwischenanalysen auf dem PC zu erstellen, aktuelle Werte anzuzeigen und neue Steuerungsdaten in den Prozessor auf der Karte zu übertragen. Das Echtzeit Multi-Tasking Betriebssystem (im EPROM gespeichert) sorgt dafür, daß die eigentliche Meß- oder Regelungsaufgabe von der Kommunikation mit dem PC unbeeinträchtigt weiter läuft.

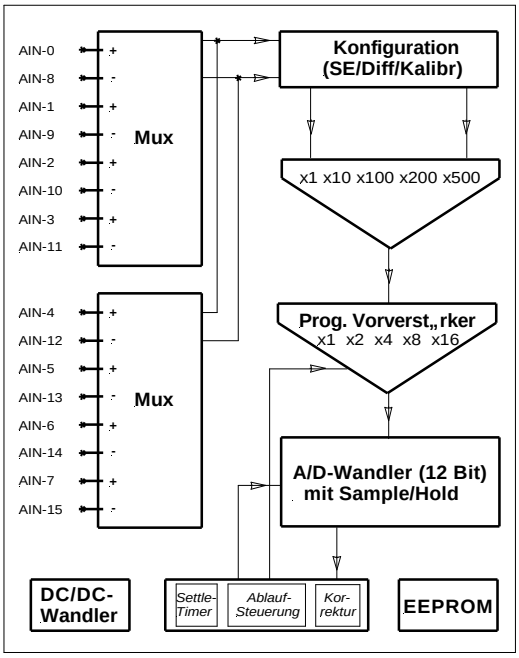


Bild 2.1-3 zeigt das Blockschaltbild des A/D-Modul M-AD12-16 mit 16 analogen Eingängen.

Seine besonderen Eigenschaften sind:

16 massebezogene oder
8 Differenzeingänge,
kanalweise per Software wählbar

12 Bit Auflösung

Wandlungszeit 1.8 µs

16 Eingangsbereiche
kanalweise per Software wählbar,
±312,5mV ... ±10V

Sample/Hold Verstärker

Bild 2.1-3 A/D-Modul für MODULAR-4/486

2.1.4 Zeitgleiche Erfassung

Der übliche Aufbau einer Meßwerterfassungskarte, mit einem A/D-Wandler mehrere Eingangskanäle zu digitalisieren, ist durch die Verwendung eines Multiplexers, eines elektronischen Umschalters gekennzeichnet. Er schaltet bei Mehrkanalmessungen zyklisch die Eingangskanäle auf den Wandler. Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen, die bei der Planung der Meßaufgabe zu berücksichtigen sind:

Die „Abtastrate“ oder das Abtastintervall h entspricht der Umschaltgeschwindigkeit des Multiplexers und stellt bezüglich der Eingangskanäle eine „Summenabtastrate“ dar, so daß die Abtastrate für einen Kanal entsprechend kleiner ist. Sie hat den Wert $h_n = h/n$ für eine Messung von n Kanälen. Das Zeitintervall für zwei aufeinanderfolgende Meßwerte eines Kanals ist folglich n*h.

Der Zeitpunkt einer Messung von Kanal n-1 ist gegenüber dem von Kanal n um das Zeitintervall -h verschoben, mehrere Kanäle können also nicht gleichzeitig gemessen werden.

Bild 2.1-4 veranschaulicht die zeitliche Folge von Meßwerten einer Dreikanalmessung, bei der das gewählte Abtastinterval *h* und der Abstand zwischen zwei Meßpunkten eines Kanals *3h* ist.

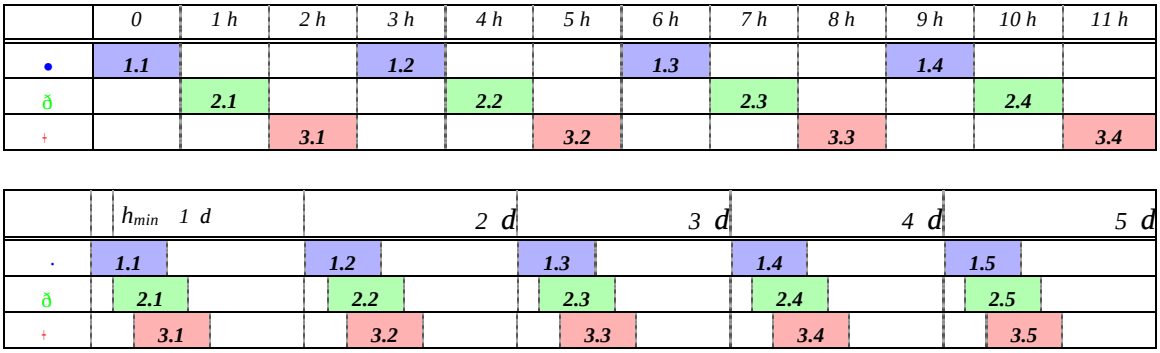
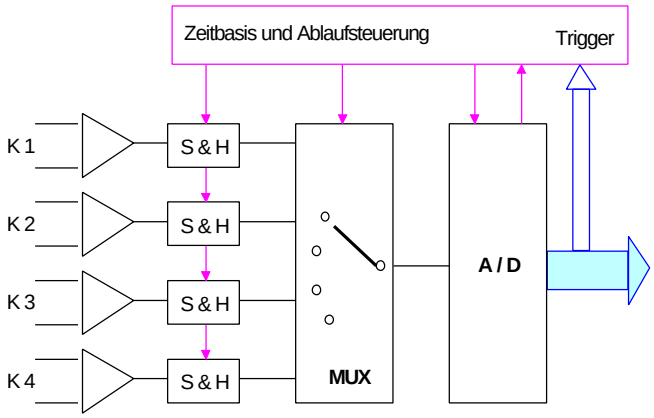


Bild 2.1-4 Meßwertreihenfolge bei 3-Kanälen (Abtastung: normal / Burstmodus)

Der Einfluß der Umschaltzeit kann verringert werden, wenn die Karte im Burst-Modus zu betreiben ist und die Signalfrequenzen im Vergleich zur größten möglichen Abtastfrequenz ($f_{max} = 1/h_{min}$) klein sind. Dieser Modus verwendet für den Multiplexer immer die höchste Umschaltgeschwindigkeit, erreicht damit h_{min} zwischen den Kanälen und verzögert den Start des nächsten Umschaltzyklus um den Betrag δ-n*h_{min}. Vollständig ist dieser Fehler nur zu vermeiden, wenn die Karte einen separaten A/D-Wandler pro Kanal besitzt. Damit steigen jedoch die Kosten für Bauteile und der Aufwand für den synchronen Betrieb der Wandler ganz erheblich an.



Eine weitere Fehlermöglichkeit liegt darin, daß sich während der Wandlungszeit das anliegende Signal ändert. Dagegen helfen sogenannte Abtast / Halte-Verstärker (Sample & Hold, Bild 2.1-5), die synchron mit dem Wandler arbeiten und die analogen Signale für die Zeitspanne eines Umschaltzyklus´ konstant halten. Diese Methode führt somit zur zeitgleichen Abtastung, denn die Halteschaltungen wirken als Zwischenspeicher für die synchronen Momentanwerte der anliegenden Signale.

Bild 2.1-5 Zeitgleiche Meßwerterfassung durch Abtast/Halte-Verstärker (Sample & Hold)

2.1.5 Signalanpassung

Der Anschluß externer Signale, Sensoren oder Sensoren an eine Meßwerterfassungskarte muß bestmöglich angepaßt an ihre Eigenschaften erfolgen. Die zugehörigen Methoden, die zur Vermeidung systematischer Fehler dienen, faßt man unter dem Begriff Signalanpassung zusammen. Sie sollen

analoge Signalspannungen durch Vorverstärkung an den Arbeitsbereich von A/D-Wandlern anpassen

Der bei Analog/Digital-Wandlern prinzipiell nicht zu vermeidende Quantisierungsfehler wirkt sich vor allem bei kleinen Analogspannungen sehr stark aus. Verstärkt man diese Spannung so, daß ihr

Größtwert die volle Wortlänge des Wandlers nutzt, wird dieser Fehler genügend klein und kann vernachlässigt werden.

durch analoge Filter unerwünschte Störungen beseitigen

Störungen in analogen Signalen sind Informationen, die ursächlich nichts mit der Meßgröße zu tun haben. Sie entstehen durch Rauschen von Sensoren und Verstärkern oder durch elektromagnetische Einwirkungen auf die Signalleitungen und können die Ergebnisse verfälschen. Oftmals helfen Filter, um vor der Digitalisierung die unerwünschten Anteile aus den Signalen zu beseitigen. Filter sind elektronische Sperren, die den Durchlaß von Signalen nach dem Frequenzbereich regeln. Zum Beispiel läßt ein Tiefpaßfilter nur die Signalanteile passieren, deren Frequenz kleiner als die (wählbare) Grenzfrequenz des Filter ist, somit werden hochfrequente Störanteile im Signalstrom unterdrückt.

die höchste im Signal enthaltene Frequenz bergrenzen (Antialiasing-Filter)

Bei der Abtastung eines analogen Signals gilt das Shannonsche Abtasttheorem, nach dem die Abtastfrequenz f_a mindestens 2mal so groß sein muß, wie die höchste im Signal enthaltene Frequenz f_g: $\mathbf{f_a > 2* f_g}$ Wird diese Bedingung nicht eingehalten kommt es zu Aliasing-Effekten (Überlappung), die bei Frequenzanalysen zu völlig falschen Ergebnissen führen. Diese Fehler sind nur vermeidbar, wenn man vor der Abtastung, also im analogen Bereich, die Shannonsche Bedingung durch den Einsatz von Antialiasing-Filtern (Tiefpaß) erfüllt.

durch galvanische Trennung von Sensoren und Rechner die Entstehung von Störspannungen vermeiden.

Beim Zusammenschalten elektrischer Geräte kommt es zu Verbindungen über verschiedene Leitungen: Netzkabel (Spannungsversorgung) und Leitungen für die Signalübertragung. Dadurch entstehen oftmals Potentialunterschiede, die in den Signalen niederfrequente Störungen induzieren und die „Signalqualität“ erheblich beeinträchtigen. Abhilfe schafft hier die sogenannte galvanische Trennung. Dabei handelt es sich um elektronische Komponenten, deren Ein-und Ausgang keine galvanisch leitende Verbindung besitzen, sondern die Signale nur optisch übertragen und damit zwischen Meßeinrichtung und Rechnereingang eine isolierendeVerbindung herstellen.

Der Begriff Signalanpassung findet keine einheitliche Verwendung. Vor allem bei Meßwerterfassungskarten, an die Sensoren wie DMS oder Thermoelemente direkt anschließbar sind, bezeichnet man die notwendige Verstärkung oder Linearisierung auch als Signalanpassung. Diese Technik bietet den Vorteil, daß die Einstellungen wie Verstärkung oder Grenzfrequenzen per Rechner möglich sind. Die galvanische Trennung ist in solchen integrierten Systemen aber schwierig oder nicht möglich.

2.2 Software

2.2.1 Betriebssystem

Sämtliche Programmierhilfen und Organisationsprogramme eines Rechners werden unter der Bezeichnung *Betriebssystem* zusammengefaßt. Seine Aufgabe ist die Verwaltung der vorgegebenen Betriebsmittel und die Benutzung der Hardware. *Echtzeit*- oder *Realtime*-Betriebssysteme können innerhalb einer vorgegebenen Zeit auf externe Ereignisse (*Interrupts*) reagieren. Sie unterbrechen ein laufendes Programm, bearbeiten eine andere Aufgabe mit höherer Priorität, um nach deren Abschluß das unterbrochen Programm fortzusetzen. Ein Echtzeitsystem zeichnet sich dadurch aus, daß unter allen Umständen definiertes Antwortverhalten garantiert ist. Wenn unter einem Betriebssystem mehrere *Tasks* (Rechenprozesse) unabhängig nebeneinander lauffähig sind, spricht man von einem Multitasking-Betriebssystem. Für PCs sind zur Zeit folgende Betriebssysteme üblich:

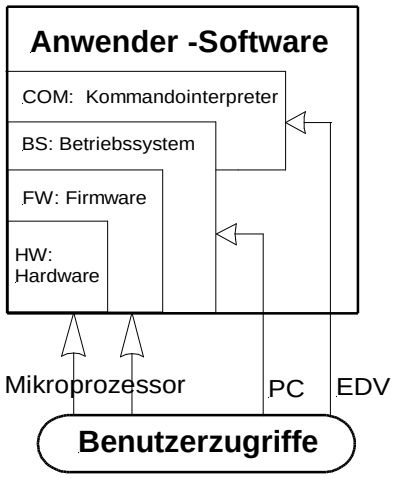


Bild 2.2-1 Hierarchische Gliederung eines Rechnersystems

DOS
Direkte Speicheradressierung nur für 640 kBytes, kein Multitasking, nutzt die Möglichkeiten moderner Prozessoren nicht aus

Windows (95, 98, NT, 2000)
Einheitliche Oberfläche und Bedienphilosophie, vereinfachter Datenaustausch zwischen den Anwendungen
Probleme bei schneller und zeitgenauer Erfassung von Meßdaten
Erheblich größerer Programmieraufwand als unter DOS

Linux
PC-Version von UNIX,
Multitasking, DMA-Betrieb,
Interrupt-Behandlung erfordert low-level-Programmierung im Kernel-Bereich, kaum Treiber für Meßwerterfassungskarten erhältlich

In der hierarchischen Gliederung von Bild 2.2-1 ist das Betriebssystem die Schnittstelle, über die ein Benutzer normalerweise mit dem Rechner in Kontakt tritt. Bei großen EDV-Anlagen wird der Rechner mit Hilfe eines in höheren Sprachen geschriebenen Programms angesprochen, bei kleineren Anlagen ist auch der Zugriff direkt auf den Betriebsystemkern oder die Firmware möglich.

2.2.2 Softwarepakete

Der effiziente Einsatz eines PCs als Meßstation setzt nicht nur eine leistungsfähige Hardware voraus, sondern verlangt auch eine benutzerfreundliche und flexible Software. Viele Hersteller von Meßwerterfassungskarten (Analog Devices, Datalog, Datatranslation, Keithley, National Instruments, Sorcus, Spectra, Stemmer, Ziegler) bieten deshalb komplette Programmsysteme an, die ohne Programmierung den Betrieb der Hardware im PC ermöglichen. Die Einteilung der handelsüblichen Software kann etwa nach dem Schema in Bild 2.2-2 geschehen, wo zwischen Systemsoftware und Anwendersoftware unterschieden wird.

Der Vorteil integrierter Software liegt unter anderem darin, daß dem Anwender durch Zusammenfassung vieler

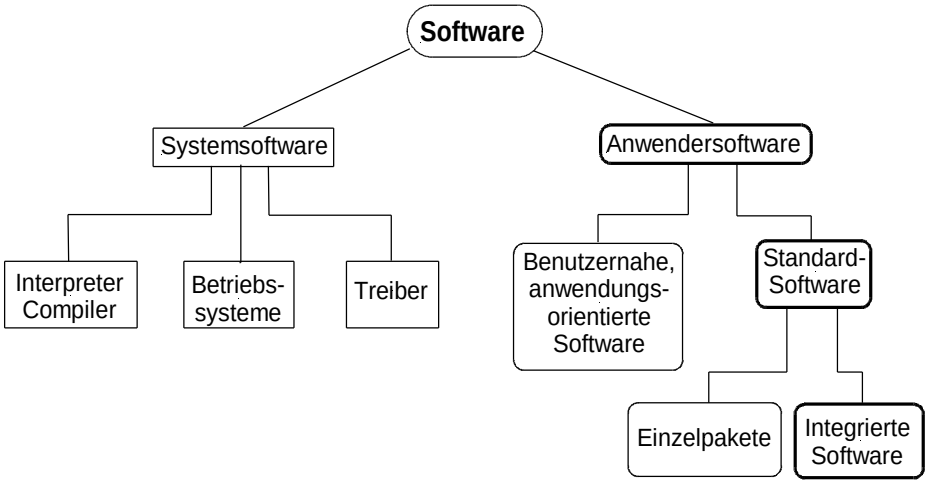


Bild 2.2-2 Einteilung von Software

verschiedener Einzelfunktionen ein leistungsfähiges Programmpaket zur Verfügung steht, das mit einer kom-

fortablen Benutzeroberfläche versehen ist und den Datentransfer zwischen verschiedenen Funktionsbereichen problemlos ermöglicht.

Es gibt heute viele Programme und komplette Systeme, deren Leistung zu beurteilen eine schwierige Aufgabe ist. Die Anforderungen, denen Meßtechnik-Softwarepakete genügen müssen, leiten sich aus dem Ablaufschema eines Versuchs ab (Bild 1-3) und sind im Schema von Bild 2.2-3 dargestellt.

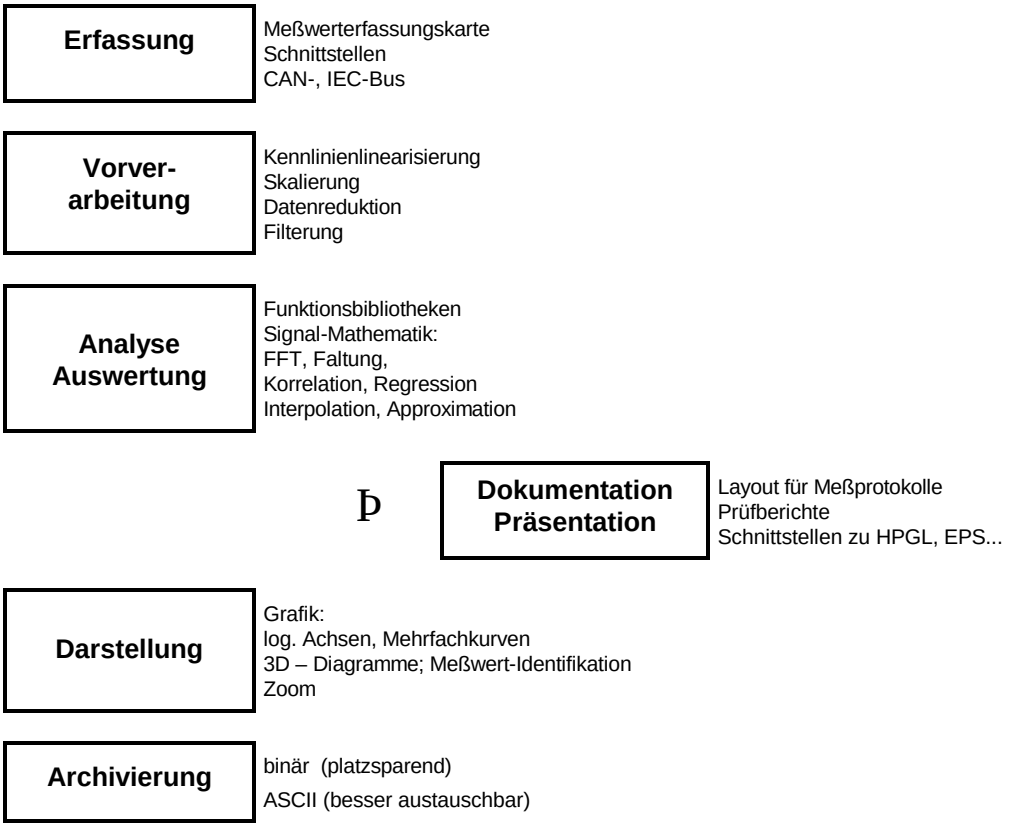


Bild 2.2-3 Anforderungen an Meßtechnik-Software

Als Kriterien für eine vergleichende Beurteilung des Softwarespektrums eignen sich zum Beispiel folgende Kategorien:

Anwendbarkeit (einfach Û schwierig)

Einfache Anwendbarkeit ist vor allem dann von Interesse, wenn die Software nicht nur von Spezialisten benutzt werden soll. Die interaktive Menü- und Fenstertechnik, sowie on-line Hilfen und Tutorials tragen dazu wesentlich bei.

Anpassungsfähigkeit (starr Û flexibel)

Dieser Begriff bezieht sich zum einen auf die Möglichkeit, spezielle, vom Benutzer gewünschte Funktionen in die Software einzubringen. Zum anderen ist damit auch gemeint, wie sich die standardmäßigen Funktionen an die jeweilige Aufgabenstellung anpassen lassen.

Ausführungsgeschwindigkeit (gering Û hoch)

kennzeichnet, wie schnell der Benutzer seine Aufgabe durch Wahl geeigneter Parameter definieren kann. Die eigentliche Ausführungsgeschwindigkeit eines initiierten Programmablaufs wird von der Taktfrequenz des Zentralen Prozessors, der Speichergeschwindigkeit und der Kompetenz der Programmierer bestimmt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einige wenige Beispiele für Softwarepakete, die aktuell (1999) zur Meßwerterfassung und Meßwertanalyse unter Windows angewandt werden. Soweit es sich um Pakete von Meßkartenherstellern handelt, sind sie bevorzugt auf die Verwendung firmeneigener Produkte abgestimmt. Daneben gibt es auch universelle Programme, die nach Installation hardwarespezifischer Treiber mit Karten vieler verschiedener Hersteller arbeiten können.

Softwarepaket	Lieferant	Merkmale
DASYLab	Datalog Mönchengladbach	Grafisch interaktives Paket auf Windows-Basis Schaltpläne für Meß- und Steueraufgaben, Interaktive Erstellung Funktionsmodule für Messen, Steuern, Analyse Visualisierung am Bildschirm während des Ablaufs Treiber für gängige Meßwerterfassungskarten Übernahme von Ergebnisse in andere Windowsprogramme
ARGUS / NT	Sorcus Düsseldorf	Echtzeitfähige Standardsoftware zum Messen, Prüfen, Überwachen unter Windows NT, 95 und 98 Umfangreiche Meß-, Auswerte- und Analysefunktionen
LABVIEW	National Instruments	Grafische Programmiersprache auf der Basis von C zum Aufbau von Meßwerterfassungs- und Steuerungssystemen mit grafischer Bedienungsoberfläche
DIADEM	Gesellschaft für Strukturanalyse GfS Aachen	PC-Werkstatt unter Windows mit Geräten aus Software zur one-line und off-line Bearbeitung technischer Daten Konzeptionell mit DASYLab und ARGUS vergleichbar Umfangreiche Treiber-Bibliothek Autosequenzen für den automatischen Ablauf wiederkehrender Sequenzen
FlexPro	Weisang GmbH Menden	Dokumentieren, analysieren und archivieren (Windows) Datenbanken für umfangreiche Meßdateien Importfilter für unterschiedliche Datenformate Script-Sprache zur Erstellung von Formeln Darstellung in 2D-, 3-D-Diagrammen, Tabellen
Mathcad	Softline GmbH Oberkirch	Software-Paket unter Windows für interaktive, mathematisch-technische Berechnungen Einfache Bedienung durch Symbole und Operatoren, umfangreiche Hilfsmittel

Die Bedienung der ersten drei Programme ist äußerlich verschieden, im Prinzip aber sehr ähnlich. Am Beispiel von DASYLab sollen die Konzeption, die Art der Bedienung und wesentliche Funktionen veranschaulicht werden.

Komplexe Meß-, Steuer- oder Simulationsaufgaben werden interaktiv am Bildschirm gelöst. Am Anfang steht der Entwurf eines Schaltplans, in dem durch Plazierung symbolisierter Funktionseinheiten (Module) und ihre Verbindung der Ablauf der Aufgabe logisch dargestellt ist. Hinter jedem Funktionsblock (z.B. Handregler, Funktionsgenerator, A/D-Wandler, Trigger, Schreiber) verbirgt sich eine Tabelle, in welche die für die Ausführung der Funktion nötigen Parameter einzutragen sind. Nach dem Start des Ablaufs erlaubt eine Vielzahl von Analyse und Visualisierungsmoduln, den aktuellen Stand von Meßwerten, Zwischenauswertungen und logischen Zustandsgrößen auf dem Bildschirm darzustellen.

Bild 2.2-4 enthält die wichtigsten Elemente des Programms:

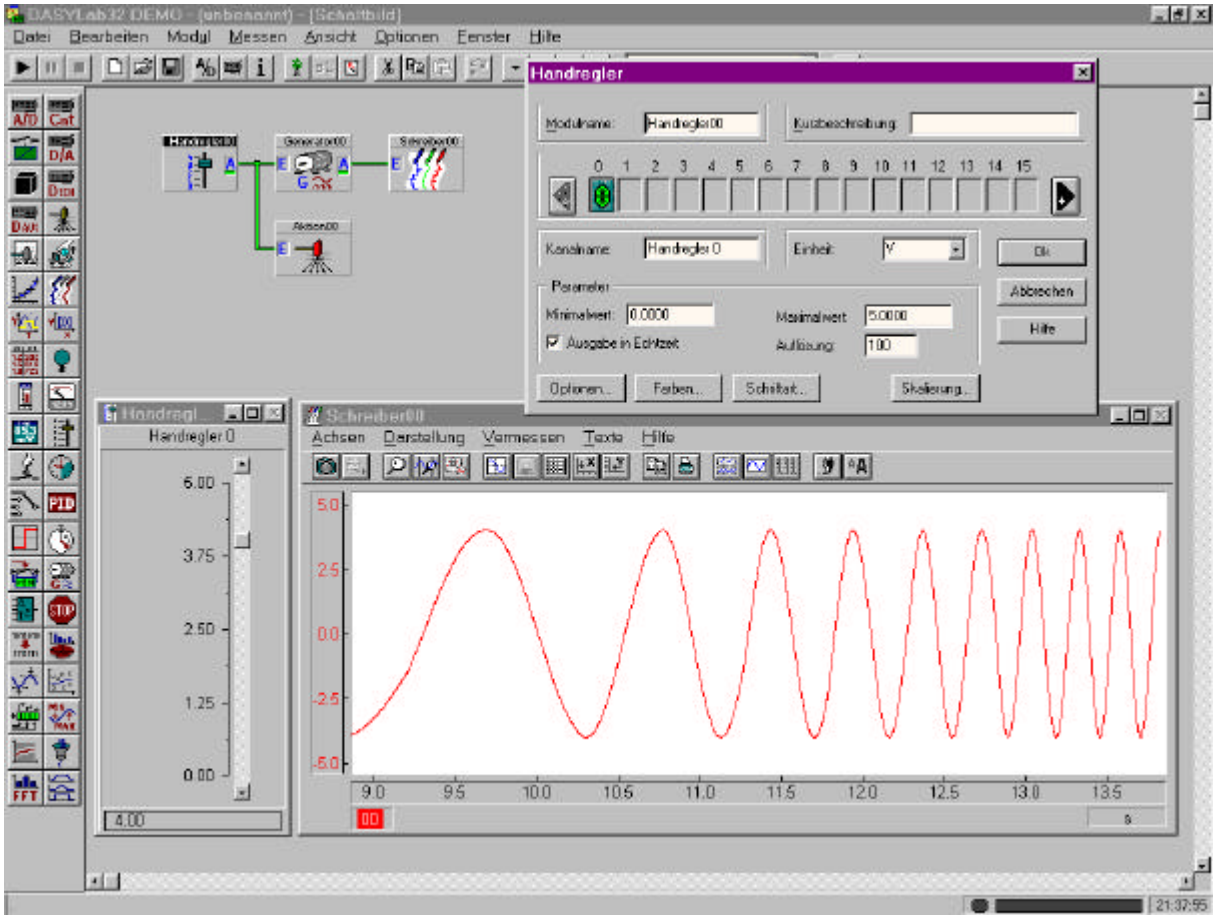


Bild 2.2-4 Windows-Oberfläche des Programms DASYLab

Die *Menüleiste* am oberen Rand mit den Begriffen, die für eine Gruppe von Befehlen oder Funktionen steht und darunter die Funktionsleiste mit den besonders häufig benötigten Menübefehlen.

Die *Modulleiste* am linken Rand, eine Liste von Symbolen zur schnellen Auswahl von Moduln per Mausklick und Plazierung im Schaltplan.

Der *Schaltplan* besteht aus den Moduln Handregler, Generator, Schreiber und Aktion. Er befindet sich links oben im Bild 2.2-4.

Die Parametertabelle (für den Handregler), die nur kurzfristig, zur Eingabe in einem separaten Fenster erscheint. Visualisierungsmoduln: Handregler und das Fenster für die zeitabhängige Darstellung der generierten Werte.

Der Schaltplan beschreibt die einfache Aufgabe, mit dem Generator ein frequenzmoduliertes Sinussignal zu erzeugen und im Fenster des Schreibers darzustellen. Mit Hilfe des Handreglers wird ein Signal für den Eingang des Generators erzeugt, das die Frequenz proportional verändert. Überschreitet das Ausgangssignal des Handreglers die Schwelle von 3.75, löst dieses Ereignis im Block Aktion die Beendigung des Schaltplanablaufs aus.

Außerdem ist es möglich, im Fenster „Schreiber“ eine Analyse der aufgezeichneten Daten durchzuführen (Bild 2.2-5).Dazu dienen dann die am oberen Rand liegenden Menüs und Funktionssymbole. Mit Hilfe verschiedener Cursorformen können wichtige Punkte des Signals angewählt und die Cursorpositionen in einem Zusatzfenster numerisch angezeigt werden.

Mit diesen Möglichkeiten erfüllt dieses Programm die allgemeine Forderungen nach Anpassungsfähigkeit und besitzt außerdem eine hohe Ausführungsgeschwindigkeit.

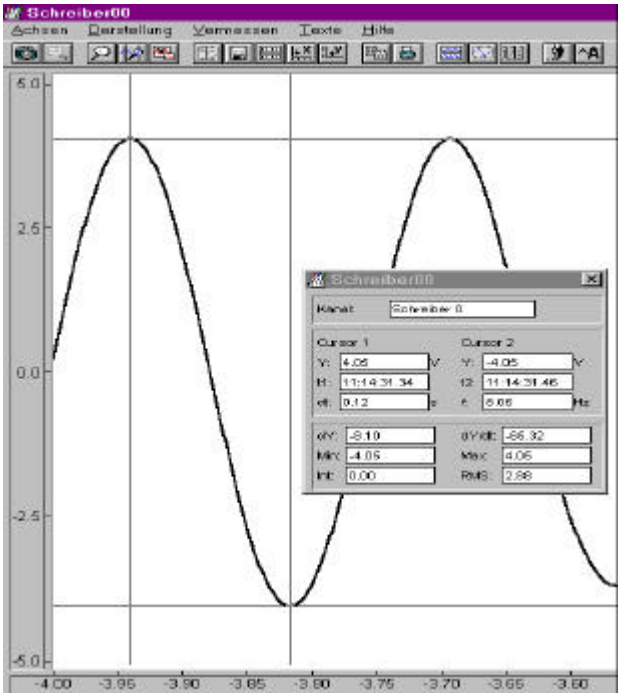


Bild 2.2-5 Interaktive Datenanalyse in DASYLab

2.2.3 Programmierung

Zu Beginn der rechnergestützten Meßwerterfassung in den 60er Jahren blieb dem Anwender oftmals keine andere Wahl, als die für seine Meßaufgabe benötigten Programme selbst zu schreiben. Wie im vorhergehenden Abschnitt dargelegt wurde, haben moderne Softwarepakete einen hohen Standard erreicht, der eine Programmentwicklung durch den Versuchsingenieur in den meisten Fällen überflüssig macht. Die Programmierung liegt heute in den Händen von Spezialisten, die nicht nur mit den Bedürfnissen der Anwender vertraut sind, sondern auch die nötigen Kenntnisse über Rechner besitzen. Für den versuchstechnisch orientierten Anwender ist es kaum noch möglich, die sich rasant wandelnden Leistungsmerkmale zu verfolgen und darauf abgestimmte eigene Programme zu entwickeln.

Als Beispiel für die Notwendigkeit eigener Programmentwicklungen seien Anwendungen in der Versuchsteuerung genannt, die zur Steigerung der Ausführungsgeschwindigkeit auf intelligenten Meßwerterfassungskarten (Signalprozessorkarten) ablaufen müssen. Doch auch in diesem Bereich stehen Hilfsmittel zur Verfügung, um eine low-level-Programierung in Assembler zu vermeiden. Damit ist es dann möglich, höhere Programmsprachen einzusetzen und mit Hilfe einer Bibliothek von Funktionsaufrufen auch die Basisfunktionen eines Prozessors anzusprechen. Die am häufigsten angewandte Programmiersprache in diesem Bereich ist C /C++ , wogegen Pascal, Fortran, ADA hier keine Bedeutung haben. Andere Sprachen, wie Pearl oder Modula decken spezielle Anwendungsgebiete ab, werden aber nicht die Bedeutung und Verbreitung von C erreichen.

2.3 Speicherung, Datenreduktion

Es gibt zwei Kategorien von Versuchen, die sich hinsichtlich Dauer und Geschwindigkeit von einander unterscheiden:

Kurzzeitmessungen mit hohen Abtastraten

Versuche dieser Art haben die Erfassung hoher Signalfrequenzen oder impulsförmiger Ereignisse zum Ziel. Um die benötigten Geschwindigkeiten zu verwirklichen, muß dabei mit DMA-Transfers in einen Halbleiterspeicher gearbeitet werden. Eine Datenanalyse parallel zur Erfassung ist dabei im allgemeinen nicht möglich. Die Auswertung erfolgt deshalb erst nach Ende der Meßwerterfassung. In dieser Kategorie ist häufig die Zusatzbedingung zu erfüllen, daß unabhängig von der verfügbaren Speichergröße keine Lücke im Datenstrom entstehen darf.

Langzeitmessungen von Signalen mit geringen Änderungsgeschwindigkeiten

Langzeitmessungen dienen im allgemeinen der Erfassung von zeitveränderlichen Vorgängen, wie Kriechen oder Ermüden. Sie verursachen Änderungen von charakteristischen Meßgrößen, die sich sehr langsam entwikkeln und deshalb zu Beobachtungszeiten von Tagen oder Wochen führen können. Um den Speicherplatzbedarf so klein wie möglich zu halten, werden die gemessenen Daten im allgemeinen erst nach einer Zwischenauswertung und nur in reduzierter Form gespeichert.

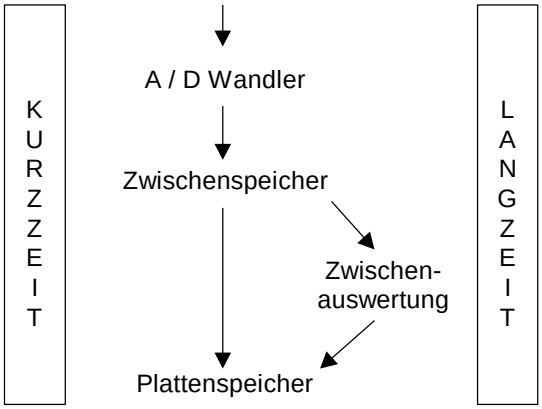


Bild 2.3-1 Funktionaler Ablauf von Kurz- und Langzeitmessungen

Bild 2.3-1 veranschaulicht den funktionalen Ablauf beider Kategorien. Nach der Digitalisierung (A/D-Wandler) finden sich die Meßwerte in einem Zwischenspeicher (Halbleiter), der je nach Speicherkapazität am Ende oder während der Messung auf ein anderes Speichermedium (Festplatte) zu übertragen ist. Dabei zeigt sich dann der Unterschied für beide Versuchsarten: Bei Langzeitversuch besteht die Möglichkeit, die im Zwischenspeicher befindlichen Daten vor ihrer endgültigen Speicherung einer Zwischenauswertung zu unterziehen und ihre Menge drastisch zu begrenzen.

Bei alten DOS-Rechnern war die Menge des verfügbaren und adressierbaren Halbleiterspeichers, sowie die beschränkte Kapazität von Plattenspeicher das zentrale Problem, das die Strategien der Meßwerterfassung ganz erheblich beeinflußt hat. Aber auch im Zeitalter von Pentium-Rechnern mit unvergleichlich höheren Leistungsdaten haben die früher entwickelten Techniken der Triggerung, Datenreduktion und Speicherung ihre Bedeutung nicht verloren.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Meßwerterfassung und -verabeitung ist es nach wie vor, in einem Datenstrom relevante Abschnitte und Ereignisse zu erkennen und aus der Menge aller Daten zu separieren. Insbesondere bei Langzeitversuchen ist es notwendig, schon während der Messung Auswertungen vorzunehmen und über weitere Maßnahmen zu entscheiden. Die Programmierung dieser Aufgabe wird sehr wohl durch hohe Rechnerleistung und große Speicherkapazität vereinfacht, nicht aber grundsätzlich gelöst.

2.3.1 Speicherung

Für die Speicherung von Meßwerten sind zwei Größen maßgebend:

- Anfallende Datenmenge
- Verfügbare Speichergröße

Für eine Versuchsdurchführung sind Größen, wie Zahl der Meßkanäle, Abtastfrequenz, Zeitdauer, maßgeblichen. Sie leiten sich aus der Zielsetzung des Versuchs ab und bestimmen die Gesamtmenge der anfallenden Daten. Ihre Wahl ist im allgemeinen an physikalisch-numerische Bedingungen gebunden, die nicht beliebig zu verändern sind. Ob sich eine Meßaufgabe wie gewünscht überhaupt durchführen läßt, muß in der Gegenüberstellung von Datenmenge, Speichergröße und -geschwindigkeit vorab geprüft werden. Bild 2.3-2 gibt dafür ein schematisches Beispiel.

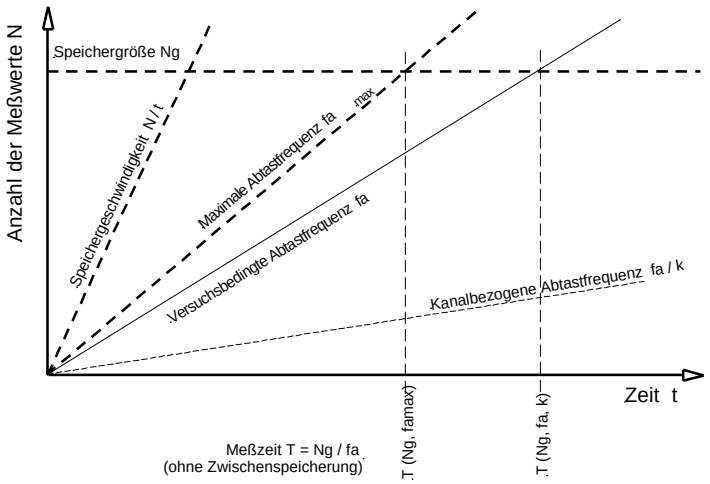


Bild 2.3-2 Datenmenge und Speichergröße

Die Speichergeschwindigkeit gibt an, wie schnell die vom A/D-Wandler kommenden Werte (z.B. per DMA) in den Speicher übertragbar sind. Sie muß größer als die maximale Abtastfrequenz fa_{max} sein. Die für einen Versuch gewählte Abtastfrequenz fa bedient alle zu messende Kanäle, für den einzelnen Kanal ist sie um den Faktor 1/k kleiner. Die Meßzeit T, die auf Grund der Speichergröße N_g möglich ist, berechnet sich als Grenzwert $T = N_g\, k/f_a$

Im Falle der Übertragung von Daten vom Zwischenspeicher auf den Plattenspeicher gibt es zwei Möglichkeiten, die Bild 2.3-3 in ihrer Wirkungsweise zeigt:

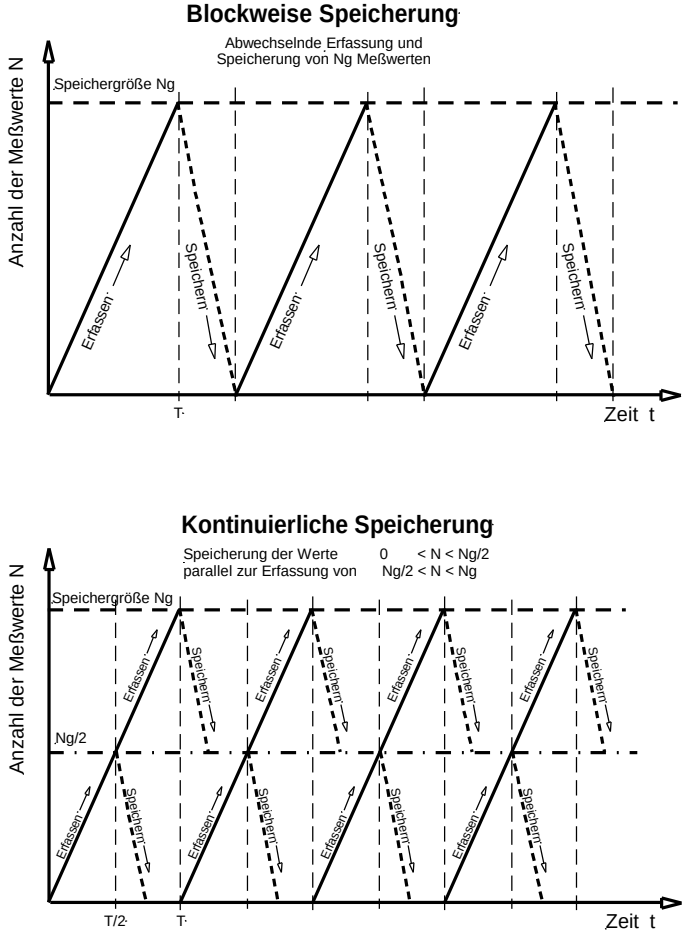


Bild 2.3-3 Blockweise oder kontinuierliche Datenspeicherung

Blockweise Speicherung

Nach Erreichen der Speicherkapazität N_g wird die Erfassungsphase E unterbrochen und diese Datenmenge im Zeitraum S auf die Platte übertragen. S bewirkt also eine Lücke im Datenstrom, der sich bei einer nachträglichen Auswertung störend oder fehlerverursachend auswirken kann.

Kontinuierliche Speicherung

Sie gelingt, wenn ein Wechsel- oder Umschaltspeicher zur Verfügung steht. Das ist eine Software-Einrichtung, die Plattentransfers parallel zu A/D-Wandlung ermöglicht: Nach Füllung des Zwischenspeichers auf den Grenzwert $N_g/2$ wird die Übertragung dieses Speicherteils initiiert und eigenständig durchgeführt. Unter der Voraussetzung, daß die notwendige Übertragungszeit S kleiner als die Erfassungszeit E ist, kann nach Erreichen des Grenzwertes N_g die weitere Speicherung in den ersten Teil umgesteuert und gleichzeitig die Übertragung des zweiten Speicherteils veranlaßt werden. Der nach diesem Schema gespeicherte Datenstrom enthält dann keine Lücken.

2.3.2 Datenreduktion durch Triggerung

Die „getriggerte“ Messung ist eine wirkungsvolle Methode zur Verringerung von Datenmengen. Ein Trigger ist ein Ereignis, das den Meßablauf steuern kann. Zum Beispiel kann festgelegt werden, eine Messung erst dann zu beginnen, wenn die Signalamplitude einen deutlichen Anstieg zeigt. Umgekehrt ist es auch möglich, nach Eintritt einer anderen Bedingung die Speicherung weiterer Meßwerte zu unterbinden. Die konsequente Anwendung verschiedener Triggerbedingungen führt dann zum ereignisgesteuerten Meßablauf und, wie Bild 2.3-4 schematisch gezeigt, zu erheblicher Datenreduktion.

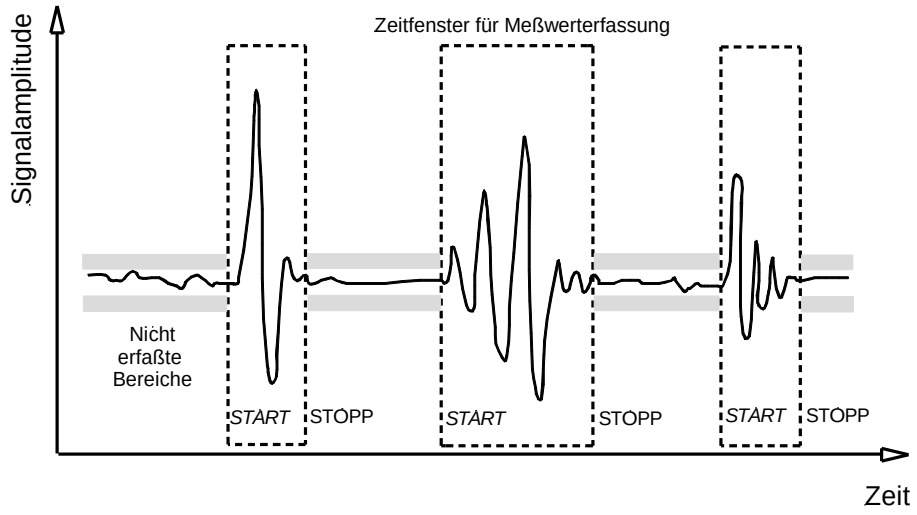


Bild 2.3-4 Datenreduktion durch getriggerte Messungen

Letztlich bestimmt die eingesetzte Hard- und Software welche Triggerfunktionen zur Verfügung stehen.

Triggerfunktionen haben über die hier skizzierten Möglichkeiten zur Datenreduktion hinaus große Bedeutung für die Versuchssteuerung. Auf der Basis ihrer Eigenschaften lassen sich komplexe Ablaufsteuerungen von Versuchen und Prüfständen konzipieren, die vor allem bei Langzeitversuchen die notwendige Sicherheit ermöglichen:

- Minimale Datenerfassung in Abschnitten, die keine Veränderungen von charakteristischen Signalen zeigen
- Hohe Datenerfassung bei plötzlich auftretenden Veränderungen
- Kontrollierte Abschaltung bei Überschreitung kritischer Grenzwerte.

3 Messwertanalyse

3.1 Ziele, Aufgaben

Experimentelle Untersuchungen in der Strukturmechanik dienen drei Zielen:

1. Charakterisierung eines Systems
   In der Strukturmechanik kommen hauptsächlich elastomechanische Modelle zur Anwendung. Ihre Eigenschaften werden häufig anhand von Beziehungen zwischen Ausgang und Eingang beschrieben (Modellbildung, Systemidentifikation)
2. Leistungsnachweis
   Entsprechend den Bau- und Sicherheitsvorschriften ist zum Beispiel am Prototyp eines Tragflügels nachzuweisen, daß die zulässigen Belastungen ohne Schädigung ertragen werden.
3. Schadensentwicklung
   Unter zyklisch wiederholten Belastungen entstehen in einem Werkstoff Schäden, die sich mit der Zeit ausbreiten. Auf der Kenntnis des Schädigungsverlaufs, den man auch als das Ermüdungsverhalten bezeichnet, beruhen die Methoden zur Lebensdauerberechnung von Bauteilen.

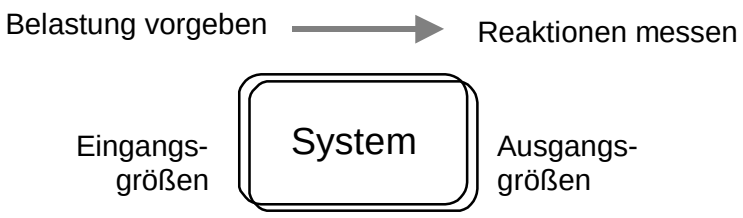


Bild 3.1-1 Systemidentifikation

Das Schema in Bild 3.1-1 beschreibt die Gemeinsamkeiten von Versuchen an sehr unterschiedlichen Systemen, die sowohl kleine Werkstoffproben als auch ganze Baugruppen sein können. Reaktionen zu messen heißt, eine Meßeinrichtung, ein Meßsystem am Objekt anzubringen, also mit Sensoren für Dehnung, Kraft oder Verformung das Verhalten auf die vorgegebene Belastung zu registrieren. Reaktionen zu messen bedeutet im einzelnen

- Funktionale Zusammenhänge finden, Systemeigenschaften ermitteln
- Störungen erkennen, kompensieren, durch verbesserten Aufbau beseitigen
  Meßunsicherheiten feststellen und verringern.

Diese Aufgaben fallen der sogenannten Meßwertanalyse zu, deren wichtigsten Ziele und Methoden in diesem Kapitel beschrieben werden. Eingangs- und Ausgangsgrößen in Bild 3.1-1 sind im allgemeinen zeitabhängig und werden mit den Begriffen Signale, Zeitsignale, oder Zeitreihen gekennzeichnet. Dementsprechend unterscheidet man zwei Signalklassen (Bild 3.1-2), die deterministische und die stochastische. Deterministische Signale sind eindeutige Funktionen der Zeit und dadurch in ihrem zeitlichen Verlauf berechenbar. Stochastische Signale schwanken ungleich nach Betrag und Vorzeichen und sind im einzelnen nicht erfaßbar. Durch die Anwendung statistischer Methode sind sie aber in ihrer Gesamtheit zahlenmäßig zu erfassen und zu kennzeichnen, z.B. durch Mittelwerte, Streuungen, Verteilungsfunktionen, oder Effektivwerte.

Bild 3.1-3 zeigt die Verbindung zwischen System und Meßeinrichtung, die eine der Fehlerquellen darstellt. Sie ist verantwortlich für die sogenannten „instrumentellen Unsicherheiten“, wozu unter anderem die Schwankungen infolge der endlichen Wortlänge eines A/D-Wandlers um ± 1 Bit gehören. Zwei andere kritische Stellen sind n und r, an denen Fehler aus der Umgebung den Datenstrom gelangen können. Dabei handelt es sich um

- Stochastische Störsignale, wie das Rauschen elektronischer Bauteile
- Störungen von 50 Hz (Frequenz der Netzspannung)

- Reste von Trägerfrequenzen in Meßverstärkern
- hochfrequente Eigenschwingungen von elektronischen Komponenten

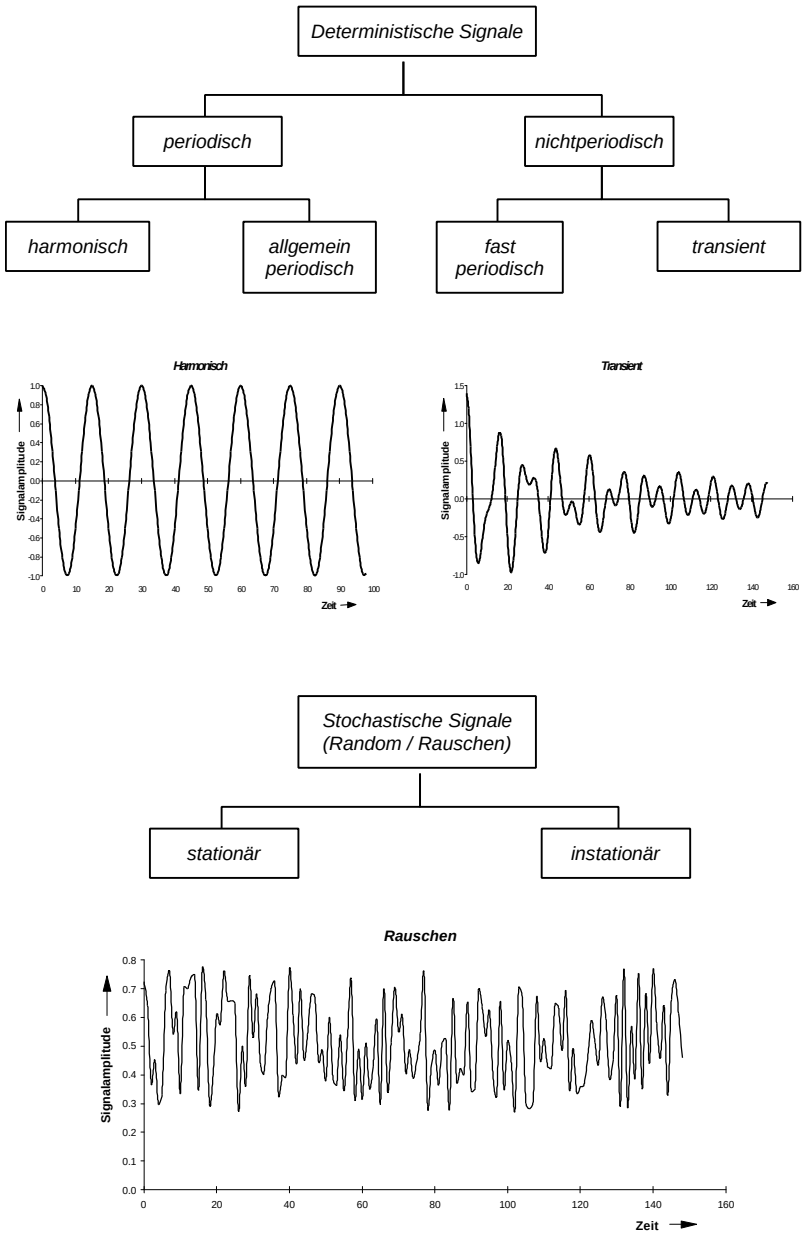


Bild 3.1-2 Klassifizierung zeitabhängiger Signale

Fehler zu erkennen und sie quantitativ zu bewerten sind wesentliche Aufgaben der Meßwertanalyse oder Meßwertverarbeitung. Ohne Angabe der zugehörigen Meßunsicherheit ist ein Meßergebnis wertlos und kann nicht als Basis weiterer Entscheidungen, wie etwa die Festlegung der zulässigen Spannung eines Werkstoffs, verwendet werden. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Erläuterung der wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Meßunsicherheit.

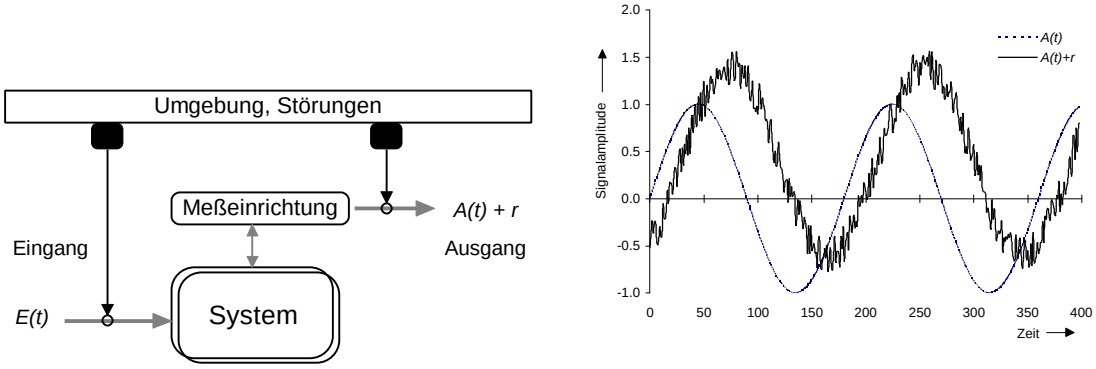


Bild 3.1-3 Fehlerentstehung durch Störungen , Fehlererkennung, Fehlerbereinigung

3.2 Mittelwertbildung

Viele physikalische Daten sind ein Gemisch aus *statischen*, zeitinvarianten und *dynamischen*, fluktuierenden Komponenten. Sie zu identifizieren ist Aufgabe der Signalanalyse, wobei der Erkennung und Bewertung von zufälligen Störungen und Fehlern besondere Bedeutung zukommt. Die bekannten statistischen Größen Mittelwert und Varianz eignen sich ganz allgemein zur Unterscheidung von statischen und dynamischen Signalanteilen.

Arithmetischer Mittelwert *T=Beobachtungszeit*	$\bar{x} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\,dt$
Quadratischer Mittelwert	$\bar{x}^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t)\,dt$
Effektivwert (RMS, Root Mean Square)	$x_{eff} = \tilde{x} = \sqrt{\bar{x}^2}$
Varianz	$s_x^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^2\,dt$
Standardabweichung	$s_x = \sqrt{s_x^2}$

Bild 3.2-1 zeigt die Blockmessung einer Gleichspannung mit überlagerten, zufälligen Störungen. Den Gleichanteil erhält man durch Mittelwertbildung, die Standardabweichung beschreibt die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert.

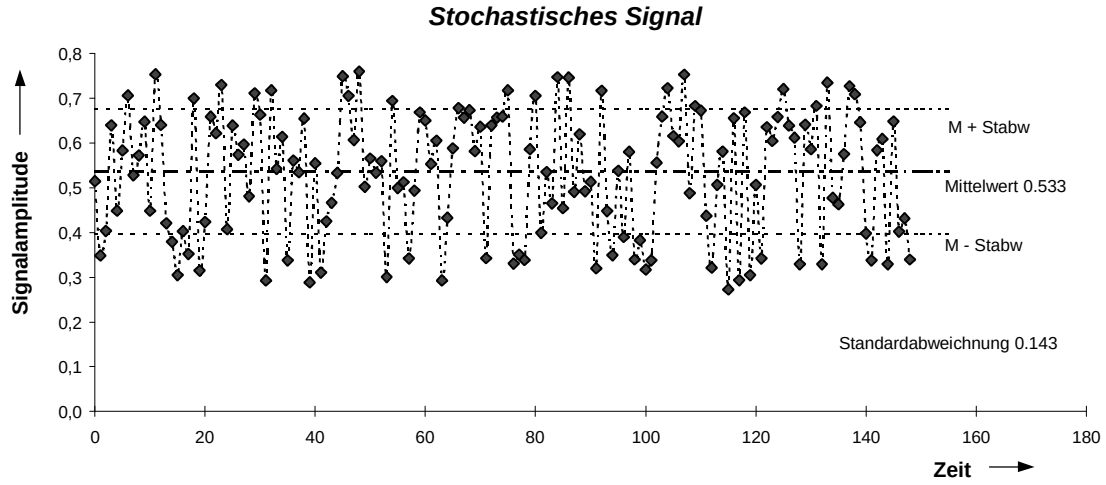


Bild 3.2-1 Blockmessung eines stochastisch gestörten Signals

Eine andere Möglichkeit zur Beschreibung von stochastischen Signalen ist die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion*. An die Stelle einer exakten, deterministisch berechenbaren Vorhersage des folgenden Momentanwertes im Signalverlauf tritt eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, die sich aus der Verteilungsfunktion (dem Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichte) ergibt. Ihre Bestimmung erfolgt durch die Klassierung der Signalamplitude in endlichen Bereichen *x+Dx* der Signalamplitude. Dazu wird gezählt, wie groß die Verweildauer in einem Abschnitt ist.

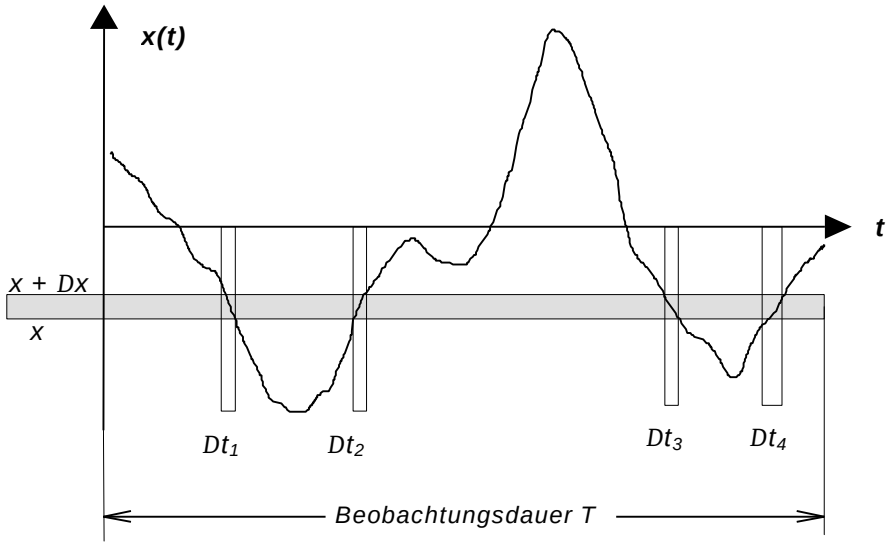


Bild 3.2-2 Klassierung stochastischer Signale

Die Summe der Zeitabschnitte $T_x = \sum_{1}^{k} \Delta t_i$ in den Signalabschnitten (Klassen)

x < x(*t*) < *x+Dx* ist die Basis zur Ermittlung der Häufigkeit, die im Grenzübergang die Wahrscheinlichkeit des Auftreten eines Wertes in einem Signalbereich ergibt:

$$W[x < x(t) \le \Delta x] = \lim_{T \to \infty} \frac{T_x}{T}$$

Für kleines *Dx* gilt die Näherung $W[x < x(t) \le \Delta x] \approx p_x \cdot \Delta x$

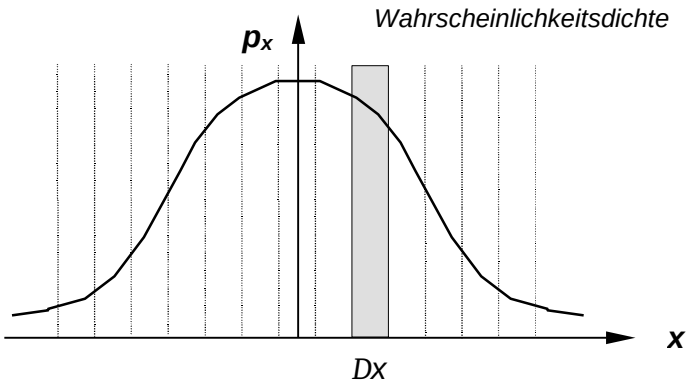


Bild 3.2-3 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

In Bild 3.2-3 ist eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion skizziert, die in der Signalanalyse eine überragende Bedeutung hat: Die „normale Dichtefunktion“ oder die Gaußverteilung (Bild 3.2-4)

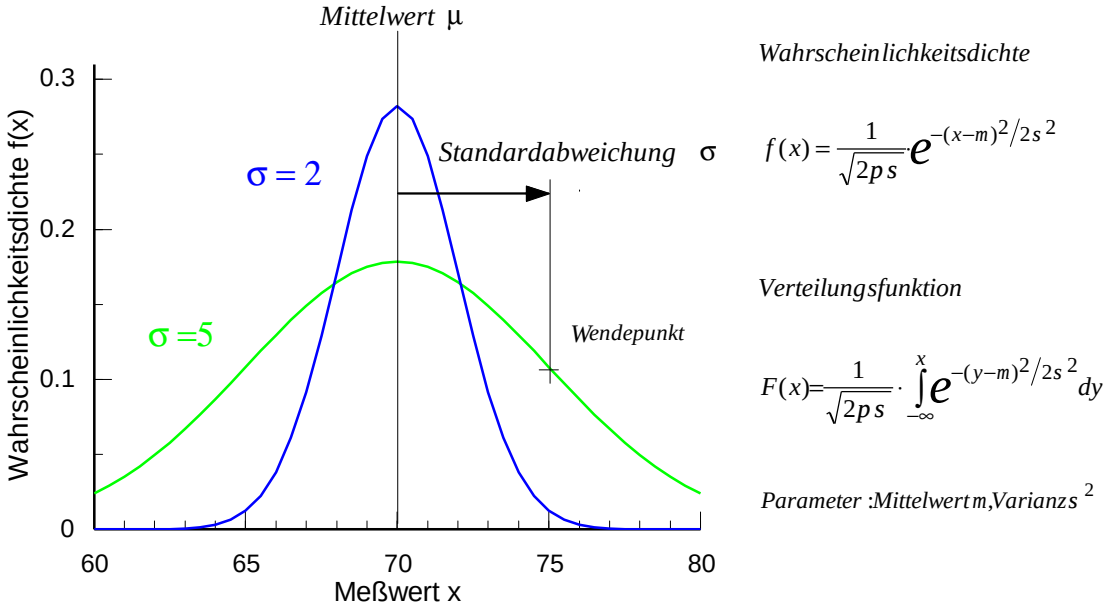


Bild 3.2-4 Gaußverteilung

In vielen Fällen wird ein „Gaußsches Rauschen“ angenommen bei dem die Rauschfunktion einer symmetrischen Glockenkurve folgt, das Maximum den Mittelwert μ kennzeichnet und die Standardabweichung σ den Abstand der Wendepunkte vom Maximum darstellt. Diese Funktion eignet sich bestens zur Beschreibung zufälliger Meßfehler, da sie aus der vielfachen Überlagerung verschiedener Fehlerquellen entstehen und in guter Näherung als normalverteilt anzusehen sind.

Auch bei der Analyse von Betriebsbelastungen sind Zählung, Klassierung und die Ermittlung von Verteilungsfunktionen wichtige Hilfsmittel. In diesem Bereich der Werkstoffprüfung und Lebensdaueruntersuchung kommt es darauf an, die im Betrieb gemessenen, regellosen Beanspruchungen in Sequenzen umzusetzen, die dann in Prüfstandsversuchen zum Einsatz kommen. Ihr Verlauf soll im Prüfkörper die gleichen Schädigungen verursachen, wie sie unter Betriebsbedingungen im Bauteil auftreten.

3.3 Kurvenanpassung

Bei Meßwertpaaren (x_i, y_i) stellt sich die Frage der Korrelation (Wechselbeziehung), das heißt welche Abhängigkeit besitzen die Meßvariablen voneinander. Durch die Einführung spezieller Größen wird es möglich, eine Abhängigkeit zwischen den Variablen x und y quantitativ zu fassen und mit den Methoden der Ausgleichs-

oder Regressionsrechnung näherungsweise einen funktionalen Zusammenhang *y=f(x)* zu beschreiben. Die Anpassung von deterministischen Funktionen an digitalisierte Meßwertfolgen (Curve Fitting) hat im allgemeinen auch zur Folge, daß sie überlagerte zufällige Fehler ausgleichen und so zur Fehlerbereinigung beitragen. Hier finden drei Verfahren Anwendung, deren mathematische Basis kurz erläutert werden soll: Das Prinzip der kleinsten Quadrate, Orthogonalität und Fourier-Reihe.

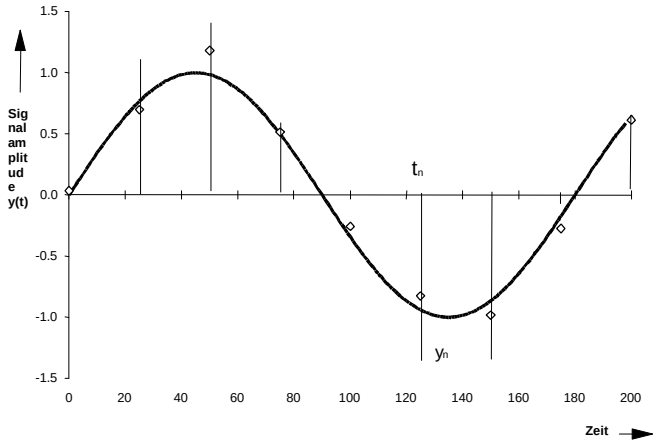


Bild 3.3-1 Streuende Meßwerte eines Sinussignals und bestmöglich angepaßte Ausgleichskurve

3.3.1 Das Prinzip der kleinsten Quadrate

Davon macht man in der ganzen Ingenieurwissenschaft und der Statistik ausgiebigen Gebrauch, wann immer eine „gute Anpassung“ benötigt wird. Bild 3.3-1 veranschaulicht das Prinzip für eine Zeitreihe [x_0, x_1, x_2, ... x_{N-1}], also eine Folge zeitdiskreter Werte. Gesucht wird eine angenäherte Funktion $y^*(c,t)$, deren Parameter c so anzupassen ist, daß die bestmögliche Anpassung an die diskreten Werte erreicht wird. Die zugehörige mathematische Bedingung lautet dann, daß der gesamte quadrierte Fehler von $y^*(c,t)$ ein Minimum wird:

$$E^2(c) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[y_n - y^*(c, t_n) \right]^2 = Min$$

Eine allgemeine lineare Form für die anzupassende Funktion ist folgende:

$$y^*(c,t) \equiv y^*(t) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m F_m(t)$$

Hier ist $y^*(t)$ eine lineare Kombination eines Satzes von Funktionen [f_0, f_1, ... f_{M-1}], in dem es M Paramter C_0, C_1, ... C_{M-1} gibt, die anzupassen sind, um E^2 zu einem Minimum zu machen. Ein bekannter Fall ist

$$F_m = t^m ; \qquad m = 0, 1, ... , M-1$$

bei dem die Koeffizienten so bestimmt werden, daß

$$y^*(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + ... + c_{M-1} t^{M-1}$$

das Polynom der kleinsten Quadrate vom Grade *M-1* ist.

Der gesamte quadrierte Fehler wird dann

$$E^2(|c_m|) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[y_n - \sum_{m=0}^{M-1} c_m \, f_m(t_n) \right]^2$$

so daß E^2 von dem Satz der Koeffizienten [c_m] abhängt.

Zur Erreichen des Minimums von E^2 müssen die partiellen Ableitungen von E^2 nach c_k für alle k gleich Null sein:

$$\P E^2 / \P c_k = -2 \sum_{n=0}^{N-1} F_{k\,n} \left[y_n - \sum_{m=0}^{M-1} c_m F_m(t_n) \right] = 0$$

Das ergibt schließlich einen Satz von M linearen Gleichungen mit den M unbekannten Koeffizienten c_0,...., c_{M-1}, deren Lösung mit bekannten Verfahren erfolgt.

3.3.2 Orthogonalität

Orthogonalität ist eine wichtige und grundlegende mathematische Eigenschaft. Im Zusammenhang mit der Kurvenanpassung hat sie besondere Bedeutung bei der Lösung von Gleichungssystemen zur Bestimmung von Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Quadrate. Wenn [f_n] und [g_n] zwei Zeitreihen der analogen Funktionen *f(t)* und *g(t)* sind, dann ist eine Orthogonalität beider Funktionen bezüglich der Abtastpunkte [t_n] gegeben, wenn folgende Beziehung gilt:

$$\sum_{n=0}^{N-1} f_n \, g_n = 0$$

Die kontinuierlichen Funktionen *f(t)* und *g(t)* sind dann und nur dann orthogonal zu einander im Intervall (*a*,*b*), wenn gilt: $\int_a^b f(t)\, g(t)\, dt = 0$

Orthogonalität führt zu einer einfachen Lösung der Bestimmungsgleichung für die Koeffizienten c_k . Orthogonalität von M Funktionen [f_m; *m=0, 1, ..., M-1*] gegenüber dem Satz von N Punkten [t_n; *n=0, 1, ..., N-1*] ist dann gegeben, wenn sie paarweise orthogonal sind, also die Beziehung erfüllt ist:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \Phi_{mn} \, \Phi_{kn} = 0; \qquad m \neq k$$

Da die Bedingung $m \neq k$ für alle Elemente außerhalb der Diagonalen der $M \times M$ – Matrix des Gleichungssystems erfüllt ist, sind nur die Diagonalelemente von Null verschieden. Die Lösung der Koeffizientengleichung folgt aus

Zusammenfassend ist also festzuhalten, daß die Bestimmung der Anpassungskoeffizienten sehr einfach wird, wenn die Näherungsfunktion eine lineare Kombination orthogonaler Funktionen ist

3.3.3 Fourier-Reihe

$$c_k = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f_n \, \Phi_{kn}}{\sum_{n=0}^{N-1} \Phi^2_{kn}}; \qquad k = 0,1 \ldots M-1$$

Die bekannte Fourier-Reihe ist eine wichtige Anwendung der obigen Begriffe „kleinste Quadrate“ und „Orthogonalität“. Sie ist in weiten Bereichen der Ingenieurwissenschaften anwendbar und schafft den einzigartigen Weg, jede periodische Funktion durch ihre Bestandteile an diskreten Frequenzen auszudrücken beziehungsweise ihre Frequenzzusammensetzung zu bestimmen.

3.3.4 Fehlerbewertung, Güte der Anpassung

Je genauer man die Wirkung stochastischer Fehler beurteilen will, desto größer muß die Menge der gemessenen Datensätze sein. Im hypothetischen Grenzfall sind dazu unendlich viele Messungen notwendig. Nur daraus ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Meßwerten zu ermitteln, deren Parameter (Verteilungsfunktion, Mittelwert, Varianz etc.) die Unsicherheit begrenzter Meßreihen kennzeichnen. Ökonomische Überlegungen bedingen die Begrenzung von Meßreihen auf eine endliche Zahl, was im Sinne statistischer Methoden eine „Stichprobe“ der „Gesamtheit“ aller Werte in einer Ausgangsverteilung ist. Die tatsächliche, die Gesamtheit betreffende Verteilung kann aus einer Stichprobe naturgemäß nicht exakt, sondern nur näherungsweise be-

stimmt werden. Ihre Parameter stellen dann nur Schätzwerte dar, deren Ungenauigkeit sich aber genau beziffern läßt. Dazu bedient man sich verschiedener Bewertungsgrößen und statistischer Tests, die dann beispielsweise die Güte der Anpassung einer gewählten Funktion an die gemessenen Datenpunkte angeben.

3.3.4.1 Korrelationskoeffizient

Im Falle einer linearen Regression ist der Korrelationskoeffizient eine Größe zur Kennzeichnung der Güte des unterstellten (linearen) Zusammenhangs zwischen den Wertepaaren x_i und y_i.

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x\, s_y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}$$

mit **s**...= Schätzwerte der Varianzen

Dieses Konzept läßt sich so erweitern, daß ein "multipler Korrelationskoeffizient" R definiert wird, der die Summe ähnlicher Terme erfaßt. Anhand linearer Korrelationskoeffizienten ist zu entscheiden, ob eine bestimmte Variable im Ansatz der Näherungsfunktion enthalten sein sollte, während der multiple Korrelationskoeffizient R die Anpassunggüte der gesamten Funktion charakterisiert.

3.3.4.2 Anpassungstests

Die Methode der kleinsten Quadrate folgt der Hypothese, daß die optimale Beschreibung einer Datenreihe *xi, y_i* durch Minimierung der gewichteten Summe der Abweichungsquadrate zwischen den Werten y_i und der Näherungsfunktion $y(x_i)$ zu erzielen ist. Diese Summe wird durch die Varianz der Näherung s^2 charakterisiert, die eine Näherung der Varianz s^2 der Gesamtheit aller Daten darstellt. Für eine Funktion mit einem konstanten Term und *n* Koeffizienten, die an *N* Datenpunkte angepaßt werden soll, gilt:

Der Faktor $n = N - n - 1$ ist die Zahl der Freiheitsgrade, die nach Anpassung von *N* Datenpunkte an *n+1* Parameter übrigbleiben. Die Varianz der Anpassung s^2 kann mit einer alternativen Größe c^2 charakterisiert werden, die bei Polynomen folgende Form hat:

$$c^2 = \sum\left\{\frac{1}{s_i^2}\left[y_i - y(x_i)\right]^2\right\}$$

Eigentlich ist c^2 eine Verteilungsfunktion und kennzeichnet die Verteilung von Stichprobenfunktionen, die sich durch mehrfache Wiederholung des Auswahlvorgangs ergibt. Infolge der Definition von c^2 als Verhältnis der geschätzten Varianz s^2 zur Varianz der gesamten Verteilung σ^2 (mal der Zahl der Freiheitsgrade ν) ist c^2 ein geeignetes Maß zur Beurteilung der Anpassungsgüte.

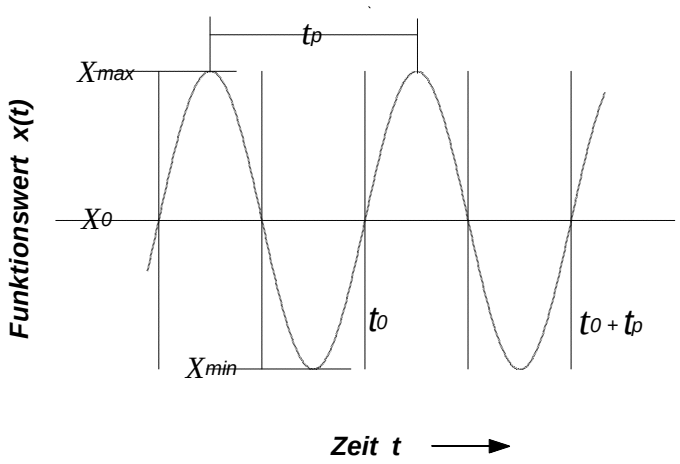
Die fundierte Beurteilung von Meßwerten, von stochastischen Unsicherheiten sowie der Qualität einer Näherungsfunktion kann im allgemeinen nicht anhand einiger Formeln erfolgen. Vielmehr sind dazu Kenntnisse der mathematischen Grundlagen von Schätzwerttheorie und Signifikanztests erforderlich, die Bestandteil statistischer Methoden sind und im Rahmen dieser Lehrveranstaltung nicht behandelt werden.

$$s^2 = \frac{\frac{1}{N-n-1}\sum\left\{\frac{1}{s_i^2}\left[y_i - y(x_i)\right]^2\right\}}{\frac{1}{N}\sum\frac{1}{s_i^2}}$$

N = Anzahl der Datenpunkte
s^2 = Schätzwert der Varianz s^2
n = Zahl der Koeffizienten der Näherungsfunktion

3.4 Harmonische Analyse im Zeitbereich

3.4.1 Parameter harmonischer Signale (DIN 1311)



Sinusschwingungen sind Vorgänge, deren Zeitabhängigkeit durch eine Sinus- oder Cosinusfunktion zu beschreiben ist. Das Argument ist dabei eine lineare Funktion der Zeit:

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(w\,t + F)$$

Die Sinusschwingung wird in Anlehnung an die Akustik auch harmonische Schwingung genannt.

Bild 3.4-1 Sinusschwingung

Bei ungestörten Signalen eignen sich folgende Formeln, um die Parameter einer Sinusschwingung zu bestimmen:

Amplitude $$\hat{x} = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

Gleichanteil $$x_0 = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}$$

Kreisfrequenz $$w = 2\,p\,f = \frac{2\,p}{t_p}$$

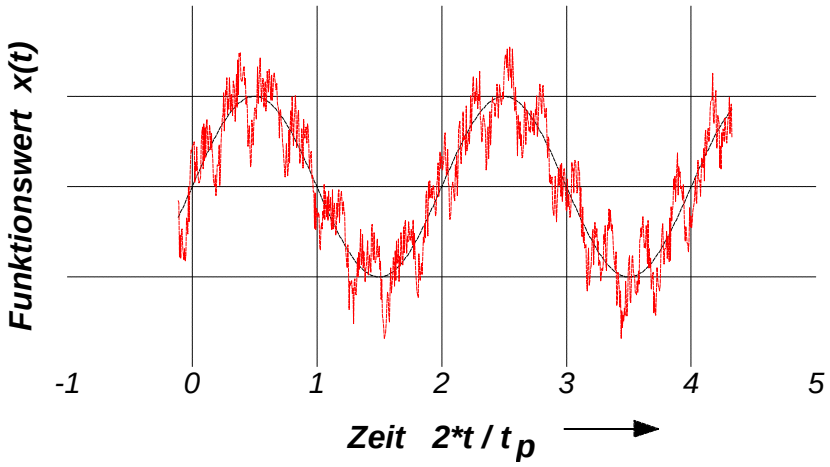
Periode $$t_p = 2 \cdot \left| t(x_{max}) - t(x_{min}) \right|$$

Phasenwinkel $$\Phi = w \cdot t_0 = \quad 2\,p\,\frac{t}{t_0}$$

$t_0 = t(x_0)$ *1. Nulldurchgang*

Die Periodendauer t_p ist die maßgebende Größe für die Ermittlung von Kreisfrequenz ω und Phasenwinkel ϕ. Sie ist

- aus Extremwerten nur ungenau zu bestimmen
  (flacher Verlauf der Funktion, unsichere Lage der zugehörigen Zeitwerte)
- aus Punkten nahe der Nullinie (Gleichanteil) besser zu ermitteln



Ein gestörtes harmonisches Signal ist ein Gemisch mehrerer Schwingungen, wobei die Sinusschwingung als Nutzsignal und die überlagerten Schwingungen als Störsignale bezeichnet werden. Störungen können sowohl periodisch als auch stochastisch sein.

Bild 3.4-2 Gestörtes Sinussignal

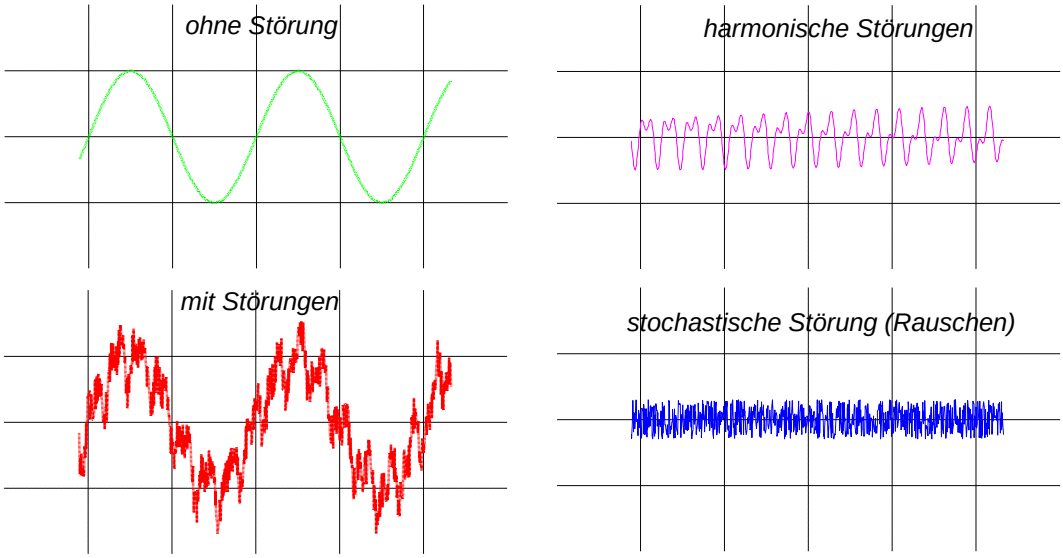


Bild 3.4-3 Signalformen

Zur Quantifizierung des Störanteils wird die Größe Signalrauschverhältnis (SRV) oder auch Störabstand benutzt. Sie gibt das Verhältnis der Signalamplitude zum Effektivwert (Standardabweichung) der Störung an und wird meistens in Dezibel (dB) angegeben.

$$SRV = \frac{Signalamplitude}{Standardabweichung\ Störung} = \frac{Signalamplitude}{Effektivwert\ Störung} = 20 \cdot \log V \quad in\ dB$$

$$V = \frac{\hat{x}}{\tilde{x}_r} \qquad Effektivwert\ der\ Störung \quad \tilde{x}_r = x_{r,eff} = \sqrt{\frac{1}{t_p}\int_0^{t_p} x_r^{\,2}\, dt}$$

SRV in dB	1	3	10	20	30	40	50	60
V	1.12	1.41	3.16	10	31.62	100	316.22	1000

3.4.2 Ermittlung der Parameter gestörter Signale

Die Parameter einer gestörten Sinusschwingung lassen sich im Zeitbereich anhand der folgenden Näherungsverfahren ermitteln.

x_0 ..... *Gleichanteil, Mittelwert*

$$x_0 = \frac{1}{t_p}\int_0^{t_p} x\,dt \qquad x_0 = \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p} x_i$$

t_p = *Periodendauer* n_p = *Meßwerte / Periode*

k = *Periodenzahl im Zeitfenster* $p = k * np$ = *Meßwertzahl in k Perioden*

$\hat{x}$ ..... *Amplitude*

Bestimmung aus dem Effektivwert

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_p}\int_0^{t_p} x^2 dt} = \frac{\hat{x}}{\sqrt{2}} \qquad \Rightarrow \qquad \hat{x} = \sqrt{\frac{2}{t_p}\int_0^{t_p} x^2 dt}$$

$$\hat{x} = \sqrt{\frac{2}{p}\sum_{i=1}^{p}(x_i - x_0)^2}$$

Φ ..... *Phasenwinkel*

Bestimmung durch (numerische) Integration über Halbperiode

$$I_{xh} = \int_{t_0}^{t_0+\frac{t_p}{2}} (\hat{x}\cdot\sin(w\ t+\Phi) - x_0)\,dt = \frac{2\cdot\cos\Phi}{w}\cdot\hat{x}$$

$$\Rightarrow \qquad \Phi = arc\cos\left(\frac{p}{t_p\cdot\hat{x}}\cdot I_{xh}\right) \quad mit \quad I_{xh} = \sum_{i=1}^{\frac{n_p}{2}}(x_i - x_0)$$

t_p ..... *Periodendauer*

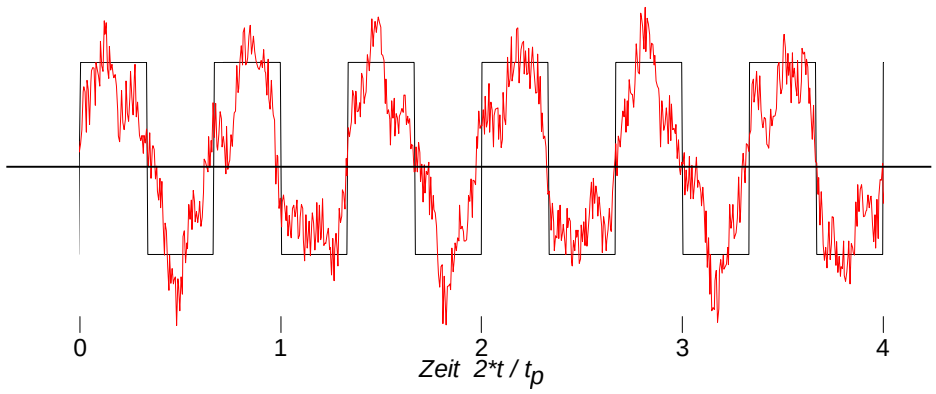
Bestimmung aus den Zeitintervallen zwischen Nulldurchgängen

$$t_p = \frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}\left(t_m{}^{+}(x_0) - t_{m-1}{}^{+}(x_0)\right) \qquad t_m{}^{+}(x_0) = \textit{Zeit der } m-\textit{ten Nullstelle mit positiver Steigung}$$

Als Näherungswert für den Gleichanteil x_0 kann der Mittelwert zwischen Maximal- und Minimalwert des Zeitsignals gesetzt werden. Die Genauigkeit der Periodenermittlung hängt davon ab, wie groß das SRV und die Abtastzeit h sind.

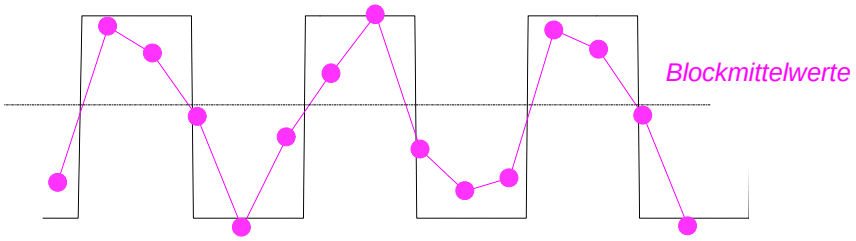
Möglichkeiten zur Bestimmung von Nulldurchgängen und Periodendauer für stark gestörte Signale:

1. Periodenbestimmung aus einem zeitsynchronen, zusätzlich gemessenen Rechtecksignal



2. Reduktion der Meßwertfolge auf ein Rechtecksignal. Damit läßt sich eine Folge von Halbperioden erstellen, die zu einer genaueren Bestimmung der Periodendauer führt.

3. Blockweise Mittelwertbildung in der Meßwertfolge. Durch lineare Interpolation zwischen Mittelwerten in unmittelbarer Nachbarschaft zur x_0 - Linie lassen sich verbesserte Näherungswerte für die Nulldurchgänge gewinnen.



3.5 Frequenzanalyse

Dieser Begriff kennzeichnet das Teilgebiet der Meßwertanalyse, das die Eigenschaften von Signalen im Frequenzbereich beschreibt. Mit Hilfe von Transformationen werden die im Zeitbereich gemessenen Signale in den Frequenzbereich übertragen. Aus dem *Zeitsignal* entsteht ein *(Amplituden)Spektrum*, das im Falle eines Signalgemisches die Frequenzen und Amplituden der Signalkomponenten auf anschauliche Weise darstellt. Davon macht man vor allem bei Struktur- oder Systemuntersuchungen Gebrauch, bei denen das dynamische Verhalten ermittelt werden soll. Ganz allgemein helfen Transformationen bei dem Bemühen, die Lösung mathematischer Probleme zu vereinfachen (Transformationsanalysis).

3.5.1 Fourier-Transformation

Die Fourier-Transformation ist ein Verfahren, das in der Ingenieurwissenschaft vielfache Anwendung findet. Sie ist wie folgt definiert (DIN 5487):

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot e^{-jw\,t}\, dt \quad \text{mit} \quad t = \text{Zeit}, \quad w = \text{Kreisfrequenz}, \quad j = \sqrt{-1}$$

Man nennt *F(w)* die Fouriertransformierte *f(t)*. Da *F(w)* eine Funktion von *w* anstelle von *t* ist, sieht man die Fourier-Transformation als eine Operation an, die aus der Orginalfunktion *f(t)* eine Bildfunktion *F(w)* im Frequenzbereich erzeugt, wobei der Frequenzinhalt von *f(t)* explizit erscheint. Die Fouriertransformierte ist eine komplexe Größe der Form:

$$F(w) = R(w) + j \cdot I(w) = \left|F(w)\right| \cdot e^{j \cdot Q(w)} \qquad R = \text{Realteil}, \quad I = \text{Imaginärteil}$$

Aus dieser Darstellung leiten sich diese Begriffe ab

$$\textit{Amplitudenspektrum:} \quad \left|F(w)\right| = \sqrt{R^2(w) + I^2(w)} \qquad \textit{Phasenspektrum:} \quad Q(w) = \arctan\left|\frac{I(w)}{R(w)}\right|$$

Ganz allgemein stellt ein „Spektrum“ eine physikalische Größe als Funktion ihrer Frequenzanteile dar.
Die Umkehrung der Fourier-Transformation oder die inverse Fourier-Transformation ist definiert durch

$$u(t) = \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} e^{jw\,t} \cdot F(w)\, dw$$

Sie ermöglicht die Bestimmung einer Zeitfunktion aus ihrer Fouriertransformierten. *F(w)* und *f(t)* stehen zueinander in Beziehung, sie bilden ein *Transformationspaar* (Bild 3.5-1), dessen Beziehung durch ein Korrespondenzzeichen symbolisiert wird: $u(t) \circ\!-\!\bullet\; F(w)$

$$u(t) = A \cdot \sin(w_0\, t) \quad A = 1 \quad -\infty < t < +\infty \qquad \textit{Periode:} \quad t_p = \frac{2p}{w_0}$$

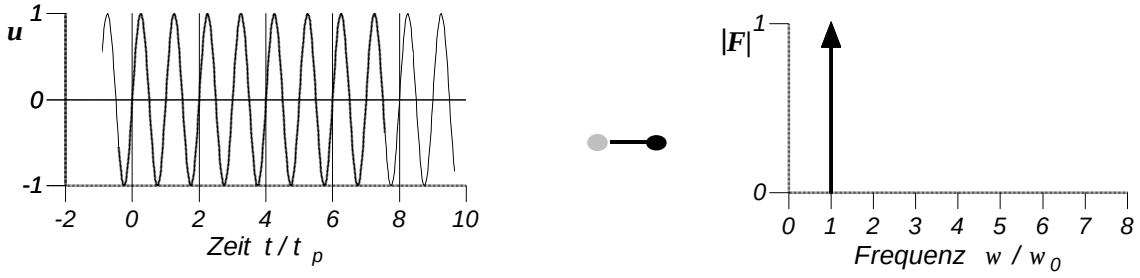


Bild 3.5-1 Transformationspaar eines Sinus-Signals (zeitlich unbegrenzt**)**

3.5.2 Diskrete Fourier-Transformation

Da in der Signalverarbeitung überwiegend Abtastwerte kontinuierlicher Funktionen vorliegen, kommt die Fourier-Transformation in ihrer diskreten Form *DFT* zur Anwendung. Die DFT hat dieselbe Beziehung zum digitalen System, wie sie die Fourier-Transformation zum analogen System hat.

Die diskrete Fouriertransformierte kann man als Näherung nullter Ordnung an *F(w)* gewinnen:

$$D(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u(n \cdot h) \cdot e^{-jw\,nh} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n \cdot e^{-jw\,nh} \qquad \text{mit dem Abtastintervall } h = Dt$$

Wenn die DFT in Real- und Imaginärteil zerlegt wird,

$$D(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n \cdot \cos nw\,T - j \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n \cdot \sin w\,T$$

dann erkennt man folgende Eigenschaften:

1. *D(w)* ist dann und nur dann reell, wenn *u(t)* an den Abtastpunkten gerade ist, also $f_n = f_{-n}$
2. *D(w)* ist dann und nur dann imaginär, wenn *u(t)* an den Abtastpunkten ungerade ist, also $f_n = -f_{-n}$
3. *D(w) und D(-w) sind konjugiert komplex*
4. *D(w)* ist über *w* periodisch mit der Periode 2π / T: $D(w) = D(w + 2p / T)$

Die ersten drei Eigenschaften gelten im wesentlichen auch für das Fourier-Integral, die vierte dagegen ist eine spezielle Eigenschaft der DFT.

Jede wirkliche Berechnung der DFT muß natürliche eine endliche Summe von Termen beinhalten und nicht die unendliche Summe der obigen Gleichung. Das bedeutet in der Praxis, daß die kontinuierliche Funktion *u(t)* in einem vorgegebenen Intervall *h* abgetastet wird.

Wenn *u(t)* als Zeitreihe der Form $u(t_n) = u(n*h) = u_n$ mit *N* Abtastwerten *[n=0,1,2,...,N-1]* vorliegt und außerdem die Zeitskala so liegt, daß die Abtastung bei *t = 0* beginnt, dann erhält man die übliche Formel für die Berechnung der DFT:

$$D_m = D\left(\frac{2p\,m}{N \cdot h}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} u_n \cdot e^{-j(2p\,mn/N)} \qquad \text{mit} \quad m = 0, 1, 2, \ldots N-1$$

Die Gleichung der inversen DFT lautet:

$$u_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} D_m \cdot e^{j(2p\,mn/N)} \qquad \text{mit} \quad n = 0, 1, 2, \ldots, N-1 \quad \textit{und} \quad w = 2pm/Nh \ \ rad/s$$

Das Ergebnis D_m der DFT ist analog zur Zeitreihe u_n eine „diskrete Frequenzreihe“, deren Frequenzintervall *Df* in obiger Gleichung erkennbar ist und die von den Parametern *N* (Zahl der Abtastwerte) und *h* (Abtastintervall) abhängig ist:

$$D f = \frac{f_a}{N} = \frac{1}{N \cdot h} \qquad \text{mit} \quad f_a = \text{Abtastfrequenz in 1/s}, \quad h = \text{Abtastintervall in s}$$

Bild 3.5-2 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der normierten Frequenzauflösung Df / f_a und der Wahl der Abtastwerte *N*. Dabei ist zu beachten, daß die Wahl von *N* nicht nur nach dem Gesichtspunkt hoher Frequenzauflösung erfolgt, sondern auch durch andere Größen, wie Dauer des zu analysierenden Signals, verfügbarer Speicherplatz oder erforderliche Abtastfrequenz f_a beeinflußt wird.

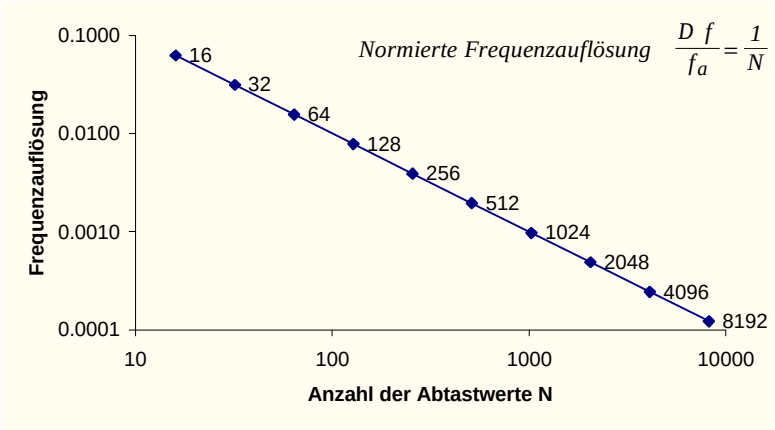


Bild 3.5-2 Frequenzauflösung als Funktion der Abtastwerte N

Die numerische Berechnung der DFT erfolgt mit der sogenannten **„Schnellen Fourier-Transformation“ FFT** (Fast Fourier Transform). Sie ist ein Algorithmus, dessen ursprüngliche Formulierung 1965 durch Cooley und Tukey veröffentlicht wurde. Die FFT ist an die Möglichkeiten digitaler Rechner angepaßt und ermöglicht eine schnelle und genaue Berechnung der DFT. Deswegen findet die FFT im Bereich der digitalen Signalverarbeitung vielfältige Anwendung. In Fällen, in denen Spektralberechnungen aus einem großen Satz von Abtastwerten vorzunehmen sind, oder auch wiederholte Berechnungen zur Unterdrückung von Störsignalen nötig sind, stellt die FFT das einzig mögliche Mittel dar, um im Rahmen vorgegebener Zeit und Rechenkosten zu Ergebnissen zu kommen.

Das wichtigste, äußere Merkmal der FFT ist, daß die Gesamtzahl *N* einer Zeitreihe der Bedingung $N = 2^k$ genügt, wobei der Exponent *k* ganzzahlig und positiv sein muß. Prinzipiell ist es auch möglich, das System von Differenzengleichungen der DFT mit Matrizenoperationen zu lösen. Hierbei ist jedoch die Zahl komplexer Multiplikationen und Additionen wesentlich höher als bei der FFT, so daß damit eine etwa zweihundertfach höhere Rechenzeit benötigt würde.

3.5.3 Abschneideeffekt

In Bild 3.5-1 ist als Beispiel für ein „zeitlich unbegrenztes Signal“ die Fouriertransformierte eines Sinus-Signals in Form einer einzelnen Spektrallinie im |F| - ω - Diagramm dargestellt.

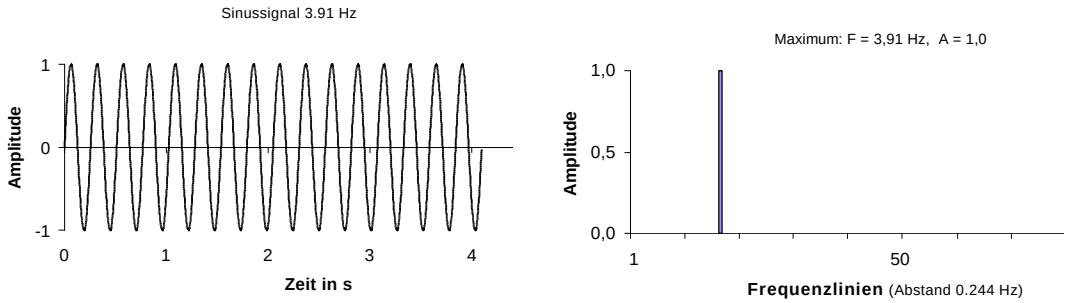


Bild 3.5-3 Sinus-Signal und Spektrum mit ganzer Periodenzahl im Zeitfenster

Durch die Praxis der Meßtechnik (Blockmessung) erfahren Signale von unbeschränkter Dauer jedoch eine Zeitbegrenzung: Nur der Teil des Signals, der sich im endlichen Zeitfenster T befindet, wird erfaßt und abgetastet. Mathematisch gesehen entspricht das einer Multiplikation der Signalfunktion u(t) mit der Wichtungsfunktion w(t). Diese besitzt im Bereich $-T/2 < t < T/2$ den Wert 1 und außerhalb dieses Bereichs den Wert Null (Rechteckfenster).

Die Fouriertransformierte des begrenzten Signals ist um die Frequenz Null herum konzentriert und hat sogenannte Seitenbänder, die mit wachsendem ω abklingen. Dieses Phänomen heißt auch Spektralverbreiterung oder leakage (= Auslaufen, Leck im spektral begrenzten Bereich) und führt dazu, daß Amplituden im Spektrum zu klein berechnet werden. Insbesondere wenn *u(t)* periodisch oder sinusförmig von unbegrenzter Dauer ist, entscheidet die Wahl des Zeitfensters über das Bild des Spektrums und die Leckverluste. Nur für den Sonder-

fall, daß das Zeitfenster eine ganze Zahl von Perioden enthält (Bild 3.5-3), entspricht das Ergebnis dem der Fouriertransfomierten des unbegrenzten Signals von Bild 3.5-1.

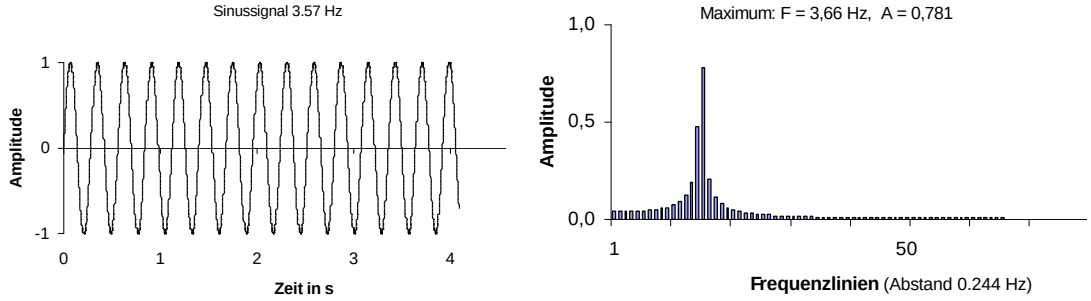


Bild 3.5-4 Sinus-Signal und Spektrum bei nicht abgestimmter Wahl des Zeitfensters

Im allgemeinen ergibt die DFT (FFT) ein verschwommenes, ungenaues Bild des tatsächlichen Spektrums, da die Wahl von Abtastintervall *h* und Zahl der Abtastwerte *N* nicht auf die Ganzzahligkeit der Perioden von *u(t)* abgestimmt werden kann. Die Ungenauigkeit betrifft sowohl die Amplitude als auch die Frequenz, wie der Vergleich der Maximalwerte in Bild 3.5-3 und Bild 3.5-4 belegt.

Die grundsätzlich mit einer DFT verbundenen Abschneideeffekte bewirken also

- die Verfälschung der Fouriertransformierten von zeitbegrenzten, deterministischen Signalen
- die Verminderung der Frequenzauflösung

3.5.4 Fensterung

Methoden zur Reduzierung der Leckverluste zielen darauf, die scharfen Ecken von *w(t)* abzurunden. Die praktische Vorgehensweise, die auch Fensterung genannt wird, besteht darin, vor der Berechnung der DFT die Funktion *u(t)* mit einem abgerundeten Fenster *w(t)* zu multiplizieren. Die DFT wird dann nicht auf die Zeitreihe u_n angewandt, sondern auf $w_n \cdot u_n$. Für die Datenfenster *w(t)* sind die unterschiedlichsten Formen in Gebrauch, die nach ihren Erfindern Bartlett-, Hanning-, Hamming-, Parzen-, Blackmann-, Kaiserfenster genannt werden.

In Bild 3.5-5 sind neben dem Rechteckfenster zwei Beispiele für die Zeitfunktion *w(t)* und ihre Fouriertransformierte *W(f)* gezeigt: Bartlett (Dreieck)- und Hanning-Fenster. Die Reduktion der Leckverluste zeigt sich in einer Abschwächung der sogenannten Seitenbänder, die jedoch mit einer Verbreiterung der zentralen Frequenz (Zunahme der effektiven Bandbreite) und einer Verringerung der Amplitude verbunden ist. Letztere ist typisch für die jeweilige Fensterfunktion und kann durch entsprechende Faktoren korrigiert werden.

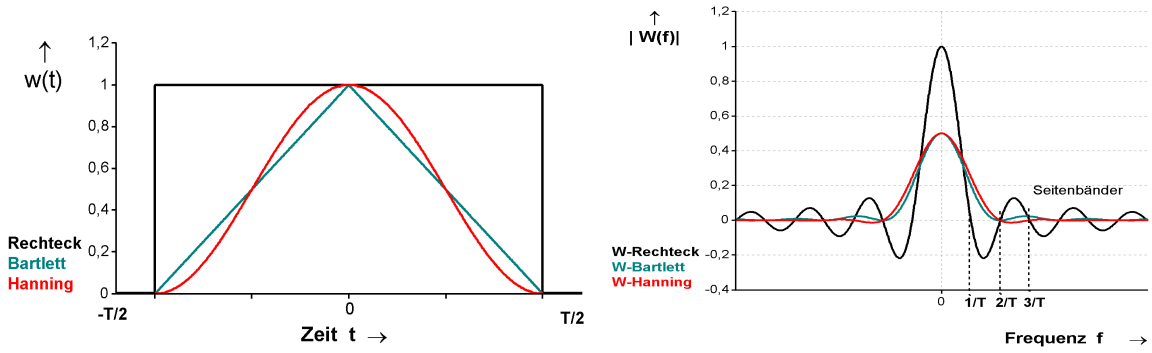


Bild 3.5-5 Fensterfunktionen w(t) und Betrag der Fouriertransformierten |W(f)|

Welches Fenster während einer Analyse zweckmäßig ist, hängt von der Aufgabenstellung ab: Sollen vor allem die im Spektrum vorhandenen Frequenzen möglichst genau bestimmt werden, dann ist das Rechteckfenster mit der kleinsten effektiven Bandbreite aller Fenster am besten geeignet. Steht aber die Ermittlung möglichst genauer Amplituden der spektralen Anteile eines Signals im Vordergrund, dann müssen andere Fensterfunktionen zum Einsatz kommen.

Am Beispiel eines generierten Sinus-Signals mit konstanter Amplitude (1) aber veränderlicher Frequenz (+5%) soll die Wirkung von Rechteck- und Hanning-Fenster veranschaulicht werden. Für jeden der 512 Werte langen Blöcke liegt eine etwas höhere Frequenz vor, was sich im Spektrum durch ein verschobenes Maximum zeigt. Das Maximum sollte eigentlich den Wert eins besitzen, tatsächlich ändert sich seine Größe periodisch. Aus der sogenannten Wasserfall-Darstellung aufeinanderfolgender Spektren ist einmal die große Schwankungsbreite des Rechteck-Fensters zu erkennen und zum anderen die Verbesserung durch das Hanning-Fenster.

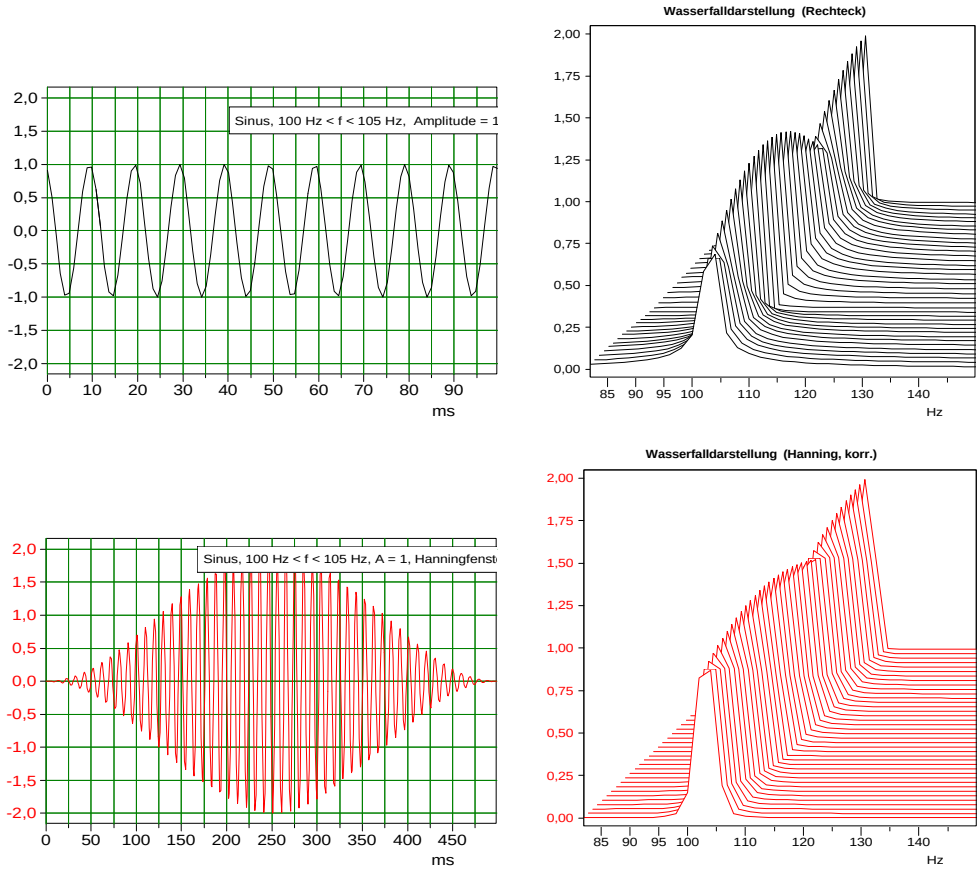
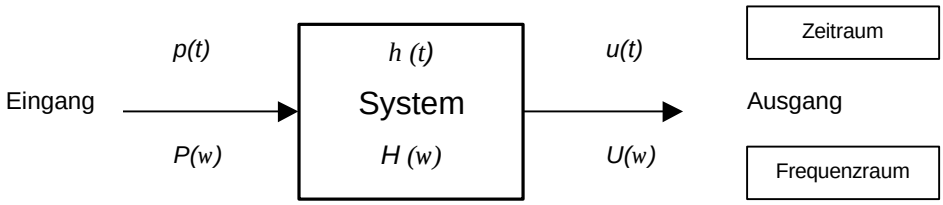

Sinus, 100 Hz < f < 105 Hz, Amplitude = 1
ms
Wasserfalldarstellung (Rechteck)
Hz
Sinus, 100 Hz < f < 105 Hz, A = 1, Hanningfenst
ms
Wasserfalldarstellung (Hanning, korr.)
Hz

Bild 3.5-6 Veranschaulichung der Amplitudenfehler von Rechteck- und Hanning-Fenster

3.5.5 Übertragungsfunktion und Faltung

In der Analyse von Systemen, bei denen ein Satz von Eingangsfunktionen einen Satz von Ausgangsfunktionen erzeugen, spielt der Begriff der Übertragungsfunktion eine wichtige Rolle. Er ist im allgemeinen bei linearen, zeitinvarianten Systemen anwendbar, die man durch lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten beschreiben kann.



Die (komplexe) Übertragungsfunktion des Systems ist der Quotient der Transformierten des Ausgangssignals *U(w)* zur Transformierten des Eingangssignals *P(w)* : $H(w) = \frac{U(w)}{P(w)}$

Die wichtigste Eigenschaft der Übertragungsfunktion eines linearen Systems besteht darin, daß sie nur vom System und nicht von der Anregungsfunktion *p(t)* abhängt. In dieser Beziehung ist sie eng verwandt mit dem Begriff der Impedanz in einem elektrischen oder mechanischen System.

Mit der Übertragungsfunktion eng verwandt ist die **Faltung,** die ein sehr nützlicher Beitrag ist, um das Verhalten linearer Systeme zu verstehen. Das Faltungsintegral leitet sich aus der Transformation der Übertragungsfunktion ab und ist wie folgt definiert:

$$p(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \cdot h(t-t)\,dt$$ wobei der * das Faltungsprodukt beschreibt.

Zum Verständnis der mathematischen Wirkungsweise, die aus dieser Gleichung nicht unmittelbar ersichtlich ist, wird auf die Literatur verwiesen. Dort wird auch gezeigt, daß die Faltung *p(t)*h(t)* und das Produkt *P(w)×U(w)* ein Transformationspaar sind. In der Signalanalyse wird analog zur DFT die diskrete Form der Faltung angewandt, bei der vorausgesetzt wird, daß die zu faltenden Signale zeitdiskret und periodisch sind.

3.5.6 Korrelationsfunktionen, Spektraldichtefunktionen

Korrelationsfunktionen sind wichtige mathematische Hilfsmittel der Signalanalyse, vor allem bei der Behandlung zufallsbedingter Prozesse. Mit ihrer Hilfe kann der Grad der Übereinstimmung von zwei Signalen festgestellt oder die Übertragungsfunktion eines untersuchten Systems gefunden werden. Da in der Meßwertanalyse häufig solche Aufgaben zu lösen sind, werden die wichtigsten Funktionen hier kurz erläutert.

Eine Korrelationsfunktion ist in gleicher Weise für zufällige und deterministische Funktionen definiert: Sie ist das gemittelte Produkt zweier Funktionen *x(t)* und *y(t)*, die gegeneinander um die Zeit *t* verschoben sind. Die Formel für die „Kreuzkorrelation“ R_{xy} lautet:

$$R_{xy} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot y(t+t)\,dt$$

Der Sonderfall der „Autokorrelationsfunktion“ R_{xx} ergibt sich, wenn nur ein Signal *x(t)* in der Formel vorkommt:

$$R_{xx} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t+t)\,dt$$

R_{xx} ist ein Maß für die Korrelation einer Funktion mit ihren eigenen vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Werten. Der Wert $R_{xx}(0)$ ist der Mittelwert von $x^2(t)$ und wird als mittlere Leistung von *x(t)* definiert. Der Ausdruck „Leistung“ ist dabei eine Verallgemeinerung der physikalischen Bedeutung dieses Terms.

Beide Korrelationsfunktionen sind die Basis zur Berechnung von Spektraldichtefunktionen mit Hilfe der Fourier-Transformation: Die Kreuzspektraldichtefunktion (Cross Spectral Density) $S_{xy}(w)$ und die Autospektraldichtefunktion (Power Spectral Density) $S_{xx}(w)$.

Kreuzspektraldichtefunktion (CSD, *y(t)* ¹ *x(t)*) $$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(t) \cdot e^{-j\cdot 2p\cdot f\cdot t}\,dt$$

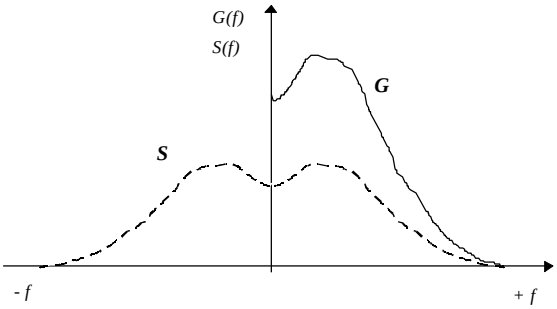
Autospektraldichtefunktion (PSD, *y(t) = x(t)*) $$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(t) \cdot e^{-j\cdot 2p\cdot f\cdot t}\,dt$$

S_{xx} heißt auch Leistungsspektraldichtefunktion

Diese Funktionen besitzen folgende Eigenschaften:

- zweiseitig symmetrisch ($-\infty < f < \infty$)
- $S_{xx}(-f) = S_{xx}(f)$
- $S_{xy}(-f) = S^*_{xy}(f) = S_{yx}(f)$ *(S* Þ konjugiert komplex)*

In der Praxis finden fast ausschließlich einseitige Spektralfunktionen $G_{xx}(f)$ und $G_{xy}(f)$ Verwendung, die nur den positiven Frequenzraum berücksichtigen:



➢ $G_{xy}(f) = 2\,S_{xy}(f)$ $\quad f \geq 0$
$G_{xy}(f) = 0$ $\quad f < 0$

➢ $G_{xx}(f) = 2\,S_{xx}(f)$ $\quad f \geq 0$
$G_{xx}(f) = 0$ $\quad f < 0$

Mit diesen abgeleiteten (komplexen) Größen $G_{xy(w)}$ und $G_{xx(w)}$ ist die in 3.5.5 vorgestellte Übertragungsfunktion $H(w)$ auf einfache Weise zu bestimmen:

$$H(w) = G_{xy}(w) / G_{xx}(w)$$

3.5.7 Mittelwertbildung

Eine Grundaufgabe der Signalanalyse ist die Bestimmung und Weiterverarbeitung von deterministischen Anteilen in einem gemessenen Signal. Wie das Beispiel in Bild 3.5-7 zeigt, sind Signale meistens von stochastischen Störungen überlagert. Zu ihrer Beseitigung benutzt man die schon mehrfach beschriebene Mittelwertbildung, die sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich angewandt wird.

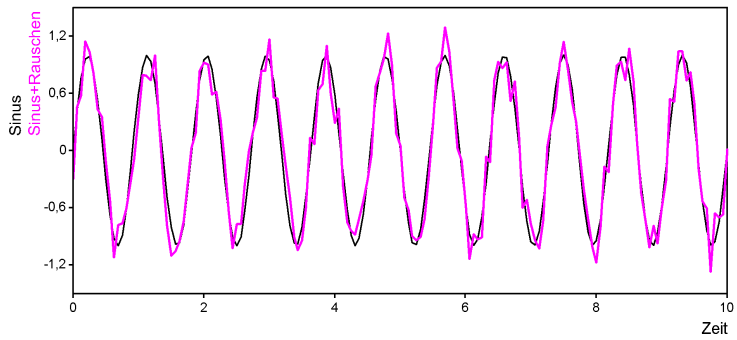


Bild 3.5-7 Sinus-Signal (A_s=1) **mit und ohne Störung** (Rauschen, A_r=0,3)

Mittelwertbildung im Zeitbereich

Sie erfolgt für eine Anzahl M von Zeitreihen (Abtastwerte der analogen Zeitfunktion $x(t)$) und dient der Verbesserung von Schätzwerten für die Zielgrößen der Messung

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M}\sum_{l=1}^{M} x_k^{(l)} \qquad x_k^{(l)} \Rightarrow M \text{ verschiedene Zeitreihen (Stichproben)}$$

$$\bar{x}_k \Rightarrow \text{Mittelwert der } k-\text{ten Meßstelle}$$

Für stochastische Signale erfolgt die Mittelung entweder sequentiell, das heißt jede Zeitreihe x_k schließt nahtlos an die vorhergehende an, oder überlappend. Bei deterministischen Signalen muß der Beginn der jeweiligen Abtastung synchronisiert werden, was zum Beispiel durch Triggerung zu erreichen ist. Durch wiederholte Abtastungen mit synchronisiertem Beginn stehen dann für den k-ten Meßwert insgesamt n_d Werte zur Verfügung, deren Mittelung stochastische Schwankungen eliminiert und den deterministischen Signalanteil unberührt läßt.

Mittelwertbildung im Frequenzbereich

Das bedeutet die Mittelung von Spektren. Die folgende Formel berücksichtigt, daß Spektren komplexe Größen sind, deren Mittelung getrennt für Real- und Imaginärteil erfolgt.

$$\overline{G}(f_k) = \frac{1}{M}\sum_{l=1}^{M}\{Re[G(f_k)] + j \cdot Im[G(f_k)]\} \quad = \quad \overline{Re}[G(f_k)] + j \cdot \overline{Im}[G(f_k)]$$

Darin sind die überstrichenen Symbole $(\overline{G}\ \overline{\mathrm{Re}}\ \overline{\mathrm{Im}})$ eine gebräuchliche Abkürzung zur Kennzeichnung des jeweiligen Mittelwertes. Welche Zahl zu mittelnder Werte für die angestrebte Verbesserung notwendig ist, muß von Fall zu Fall anhand statistischer Bewertungsgrößen untersucht werden.

Bild 3.5-8 zeigt, wie sich Mittelung und Fensterung auf das in Bild 3.5-7 dargestellte gestörte Sinus-Signal auswirken

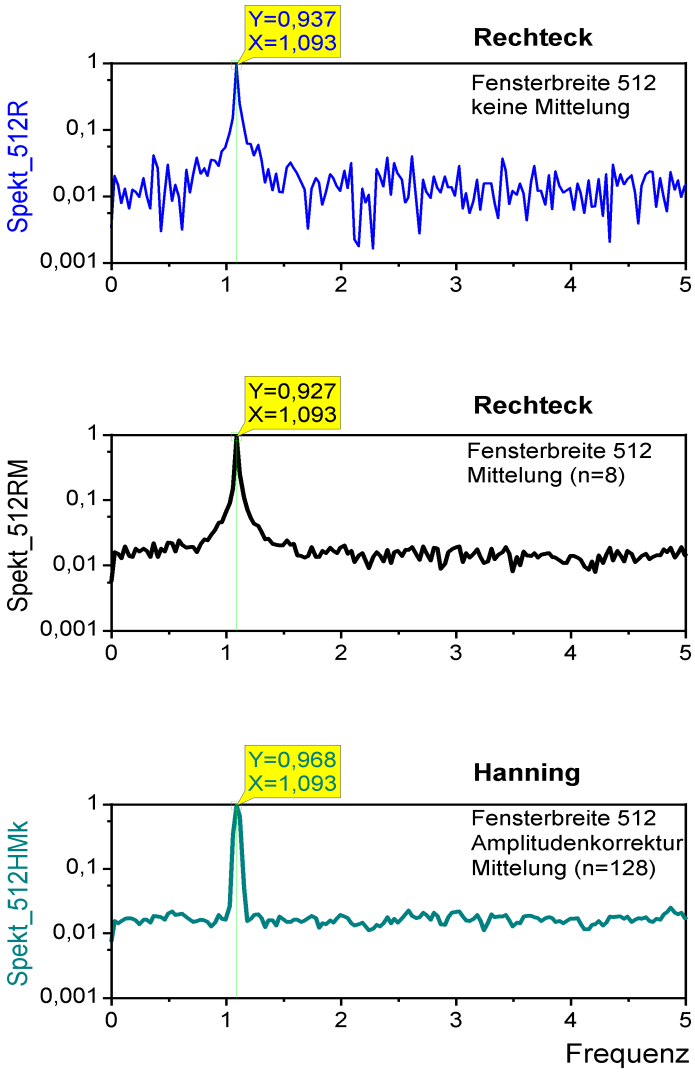


Bild 3.5-8 Wirkung von Mittelung und Fensterung

3.6 Filterung

3.6.1 Filterwirkung

Unter Filterung versteht man die Methoden, mit denen sich verschiedene Frequenzanteile in Signale unterscheiden und getrennt darstellen lassen. Wie Bild 3.6-1zeigt, dienen sie vorrangig zur Beseitigung von Störsignalen und zur Separierung ausgewählter Signalkomponenten. Ganz allgemein bedeutet „Filtern“ das Durchlassen gewisser Frequenzen eines Signals und das Zurückweisen anderer Frequenzen desselben Signals.

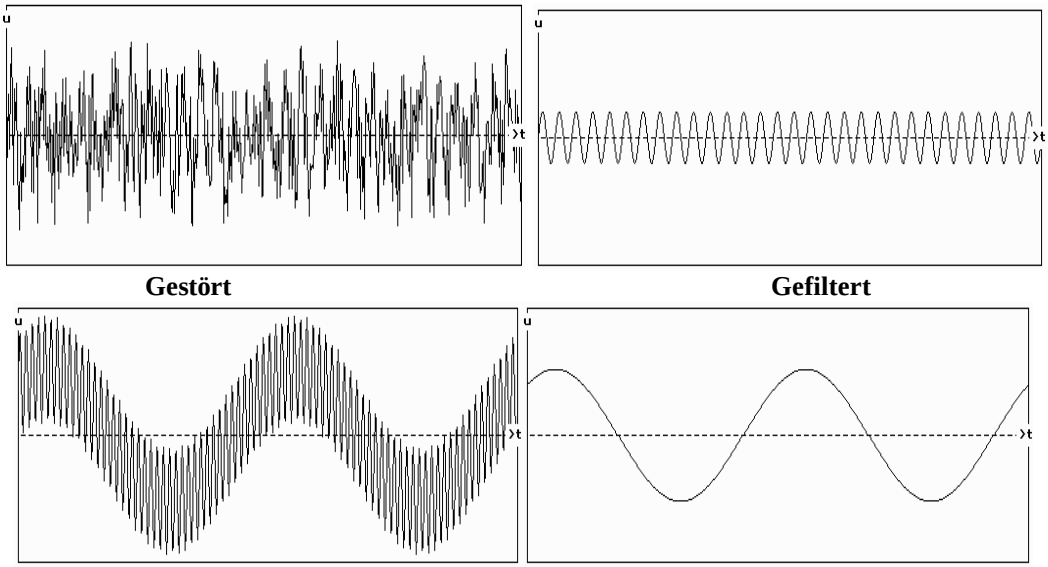


Bild 3.6-1 Filterwirkung

Systeme zur Filterung werden als analoge oder digitale Systeme verwirklicht. Analoge Filter, die zur Anwendung auf wertkontinuierliche Signale benötigt werden, sind elektronische Schaltungen, bestehend aus Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten zur Realisierung von Summierern und Verzögerungsgliedern. (Beispiel Antialiasing-Filter). Bei wertdiskreten Signalen (Zeitreihen) werden digitale Filter angewandt, bei denen mathematische Operationen die Funktionen elektronischer Komponenten übernehmen. Ihre Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen ist unvergleichlich einfacher als bei analogen Systemen. Hochwertige Geräte mit einstellbaren, variablen Parametern werden meistens als Digitalfilter ausgeführt. Wie Bild 3.6-2 zeigt, können sie auf dem Umweg über eine A/D-Wandlung am Eingang und eine D/A-Wandlung am Ausgang auch als „analoge“ Filter auf wertkontinuierliche Signale angewandt werden.

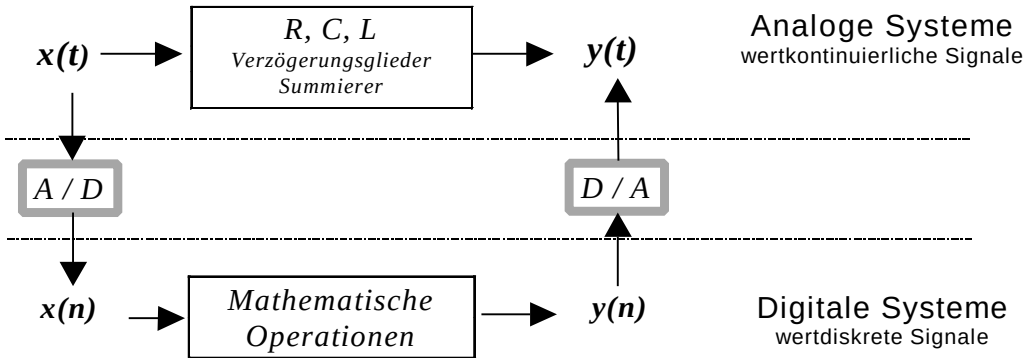


Bild 3.6-2 Analoge und digitale Filterung

3.6.2 Lineare digitale Filter

Bild 3.6-3 zeigt das Schema eines digitalen Filters, das ein System mit Eingang und Ausgang ist. Durch seine A/D- und D/A-Komponenten ist es in der Lage, direkt analoge, zeitkontinuierliche Signale *x(t)* digital zu filtern und das Ergebnis *y(t)* wiederum zeitkontinuierlich auszugeben.

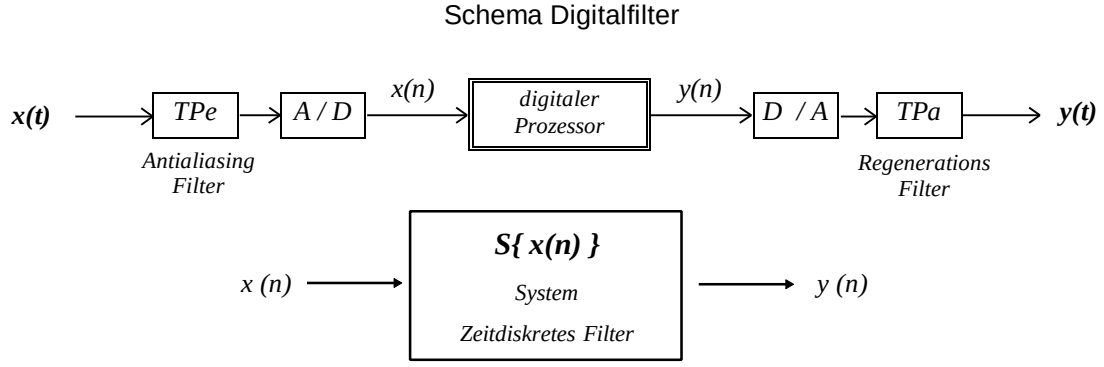


Bild 3.6-3 Schematische Darstellung digitaler Filter

Der Kern des Schemas ist eine Zuordnung der Ausgangsfolge y(n) zur Folge der Eingangswerte x(n), die mittels des Operators S{x(n)} verknüpft werden.

$$y(n) = S\{x(n)\}$$

Ein lineares, zeitinvariantes System heißt LTI-System und ist durch folgende Eigenschaften gekenzeichnet:

Linearität, wenn aus $y_1(n) = S\{x_1(n)\}$ *und* $y_2(n) = S\{x_2(n)\}$

folgt: $y_3(n) = S\{a_1x_1(n) + a_2x^2(n)\} = a_1y_1(n) + a_2y_2(n)$

(Linearkombination mit den beliebigen Konstanten a_1 und a_2)

Zeitinvarianz, wenn aus $y_1(n) = S\{x_1(n)\}$ *und* $x_2(n) = x_1(n+m)$

folgt: $y_2(n) = S\{x_2(n)\} = y_1(n+m)$

(Verschiebung des Eingangssignals um eine beliebig ganze Zahl m von Takten hat eine Verschiebung des Ausgangssignals um die gleiche Anzahl von Takten zur Folge)

Die Beschreibung des Filtersystems erfolgt im Zeitbereich mit einer lienearen Differenzengleichung mit konstanten Koeffizienten:

$$y(n) = \sum_{k=1}^{N} a_k \cdot y(n-k) + \sum_{k=0}^{M} b_k \cdot x(n-k)$$

Darin sind a_k und b_k reelle Koeffizienten und die Werte *N, M* bestimmen die Ordnung des Systems. Anhand dieser Gleichung erfolgt die Unterscheidung in die zwei grundsätzlichen Klassen digitaler Filter, die nichtrekursiven und die rekursiven Systeme. Bei nichtrekursiven Filtern ist *N = 0*, so daß jeder Wert des Ausgangssignals nur eine lineare Funktion der Abtastfolge am Eingang ist und keine Rückkopplung besteht. *N ¹ 0* kennzeichnet die rekursiven Filter, bei denen die Ausgangswerte nicht nur von den vergangenen, sondern auch von den zukünftigen Werten abhängen. Mit Hilfe der Symbolik digitaler Netzwerke ist die Filterwirkung einfach darzustellen und die Reihenfolge der erforderlichen mathematischen Operationen zu veranschaulichen.

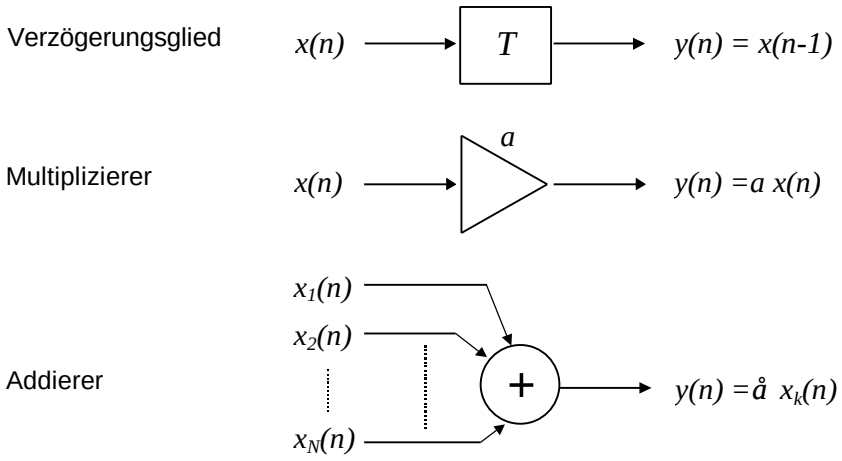


Bild 3.6-4 Symbole für Blockschaltbilder digitaler Netzwerke

Damit ergibt sich folgendes Schema zu Unterscheidung der Filterarten:

Nichtrekursive Systeme : N = 0 Þ FIR - Filter (Finite Impulse Response)

$$y(n)=\sum_{k=0}^{M} b_k \cdot x(n-k)$$

Ausgangsfolge $y(n)$ zu jedem Zeitpunkt nur von Werten der Eingangsfolge $x(n)$ abhängig, keine Rückkopplung

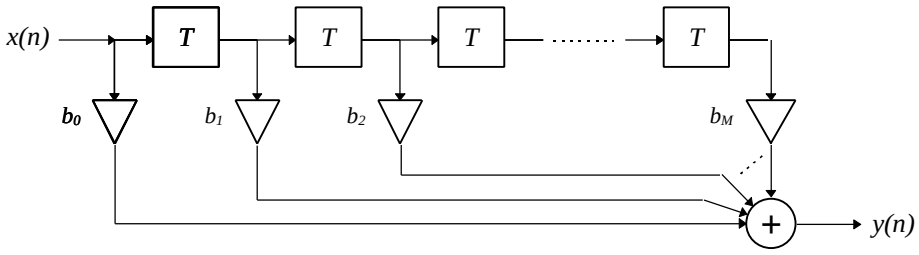


Bild 3.6-5 Nichtrekursives Filter

Rekursive Systeme: N ¹ 0 Þ IIR - Filter (Infinite Impulse Response)

$$y(n)=\sum_{k=1}^{N} a_k \cdot y(n-k)+\sum_{k=0}^{M} b_k \cdot x(n-k)$$

Rekursiver Teil der Differenzengleichung $N \geq 1$, Rückkopplungsnetzwerk, Bild 3.6-6. Die Stabilität dieser Filterart ($y(n)$ besitzt zu allen Zeitpunkten endliche Werte) ist nur für geeignete Werte von a_k zu erreichen

Zur Berechnung der Antwort eines LTI-Systems für beliebige Eingangsfolgen kann die diskrete Faltung (Convolution) benutzt werden.

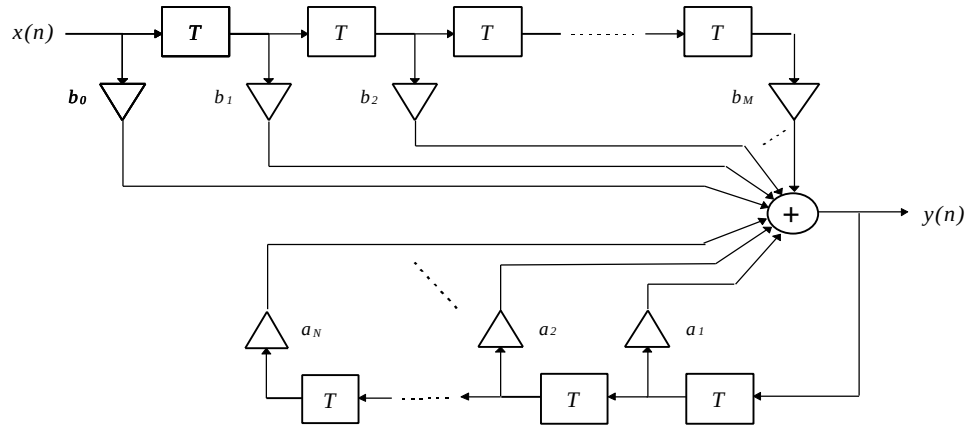


Bild 3.6-6 Rekursives Filter

3.6.3 Filterantwortfunktionen

Bild 3.6-7 zeigt als Beispiele eine Summe von 3 Sinusfunktionen mit überlagerter Zufallsfolge (Random). Es ist leicht einzusehen, daß sich die Filterwirkung am einfachsten im Frequenzbereich beschreiben läßt, denn die Filterantwortfunktion *H(f)* zeigt sofort, welche Frequenzen im Signal enthalten sind und liefert den Ansatz für die Definition der Filterfunktion, die dem Problem am besten angepaßt ist.

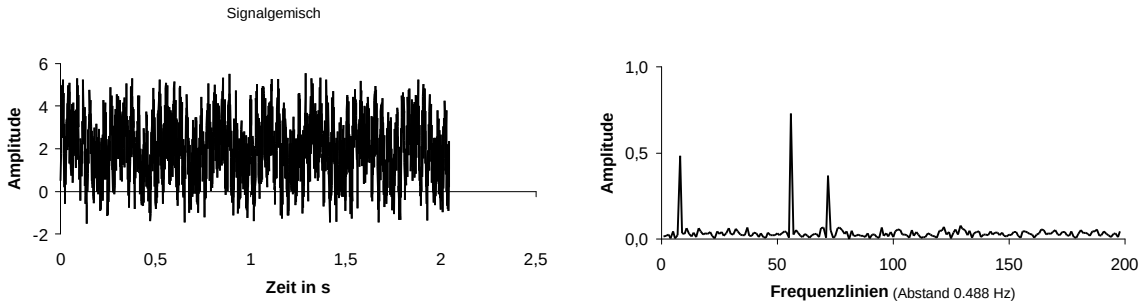


Bild 3.6-7 Signalgemisch im Zeit- und Frequenzbereich

H(f) ergibt sich aus der Anwendung der z-Transformation und ermöglicht eine vereinfachte Darstellung der Beziehung zwischen Ausgangsfolge und Eingangsfolge eines LTI-Systems. Die damit verbundenen Begriffe sind wie folgt definiert:

z - Transformation: Eindeutige Zuordnung einer Funktion der komplexen Variablen z zum diskreten Signal $x(n)$ $(-\infty < n < +\infty)$

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot z^{-n}$$ komplexe Variable $z = e^{j2\pi f}$ f = Frequenz $j = \sqrt{-1}$

Systemfunktion:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n) \cdot z^{-n}$$ $h(n)$ = Systemantwort auf Einheitsimpuls $d(n)$

Die Systemfunktion *H(z)* ist auf dem Einheitskreis identisch mit der Übertragungsfunktion *H(f)*

Zusammenhang zwischen den Koeffizienten a_k und b_k der Differenzengleichung und der Übertragungsfunktion (Filterantwortfunktion) *H(f)*

$$H(f) = \frac{\sum_{k=0}^{M} b_k \cdot z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^{N} a_k \cdot z^{-k}}$$

komplexe Größe

$$H(f) = Re\{H(f)\} + Im\{H(f)\} = |H(f)| \cdot e^{j q f}$$

$|H(f)|$ = Amplitudengang q = Phasengang

Beispiel: Differenzengleichung $y(n) = x(n) - 0{,}4\,x(n-1) + x(n-2)$
(Digitale Bandsperre 2.Ordnung)

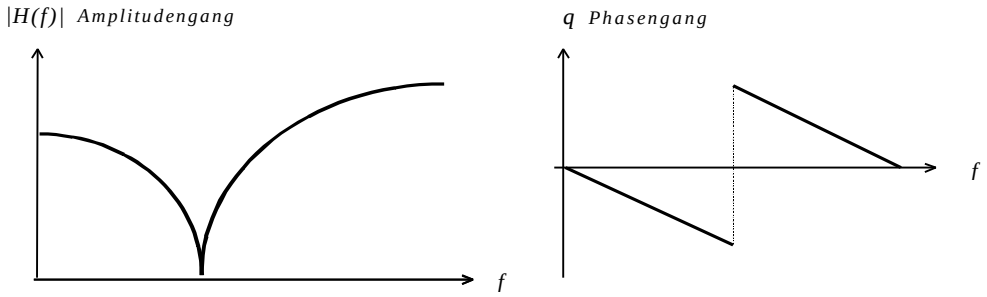


Bild 3.6-8 Spektrale Darstellung einer Bandsperre 2.Ordnung

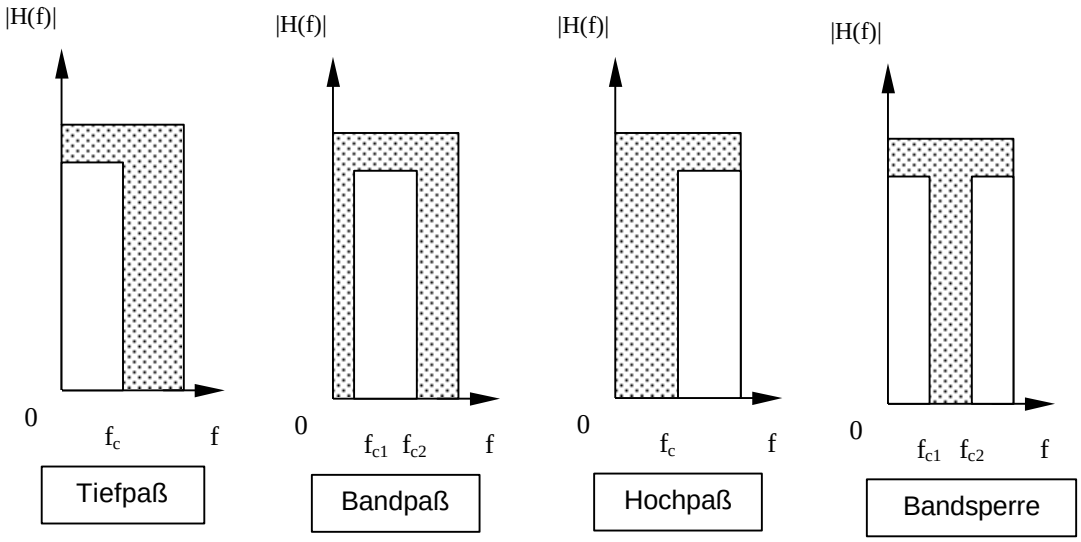
3.6.4 Filtertypen, Filterentwurf

Amplitudengang und Phasengang in

Bild 3.6-8 sind die spektralen Darstellungen der komplexen Übertragungsfunktion im obigen Beisiel einer Bandsperre. Dieser Filtertyp bewirkt, daß in der Umgebung des v-förmigen Einschnitts Frequenzen stark gedämpft und damit am Ausgang unterdrückt werden.

Es gibt vier grundlegende Filtertypen, deren ideale Übertragungsfunktion *H(f)* unten skizziert sind:

Tiefpaß	Durchlaß nur für Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz f_c
Hochpaß	Durchlaß nur für Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz f_c
Bandpaß	Durchlaß nur für Frequenzen im Frequenzband zwischen f_{c1} und f_{c2}
Bandsperre	Durchlaß nur für Frequenzen außerhalb des Frequenzbandes zwischen f_{c1} und f_{c2}



Ideale Filterfunktionen, die rechteckige Filterfunktionen mit unendlich steilen Filterflanken besitzen, lassen sich technisch nicht realisieren. Unter „Filterentwurf“ ist das Arbeitsgebiet zu verstehen,, das eine möglichst gute Annäherung an das Ideal anstrebt. Wie in Bild 3.6-9 skizziert wird angestrebt, die reale Übertragungsfunktion des digitalen Netzwerks innerhalb vorgewählter Toleranzen zu halten. Letztlich entsteht damit ein Werkzeug, dessen Restriktionen das Endergebnis einer Meßwertanalyse signifikant beeinflussen kann und die bei der Bewertung von Meßungenauigkeiten zu berücksichtigen sind.

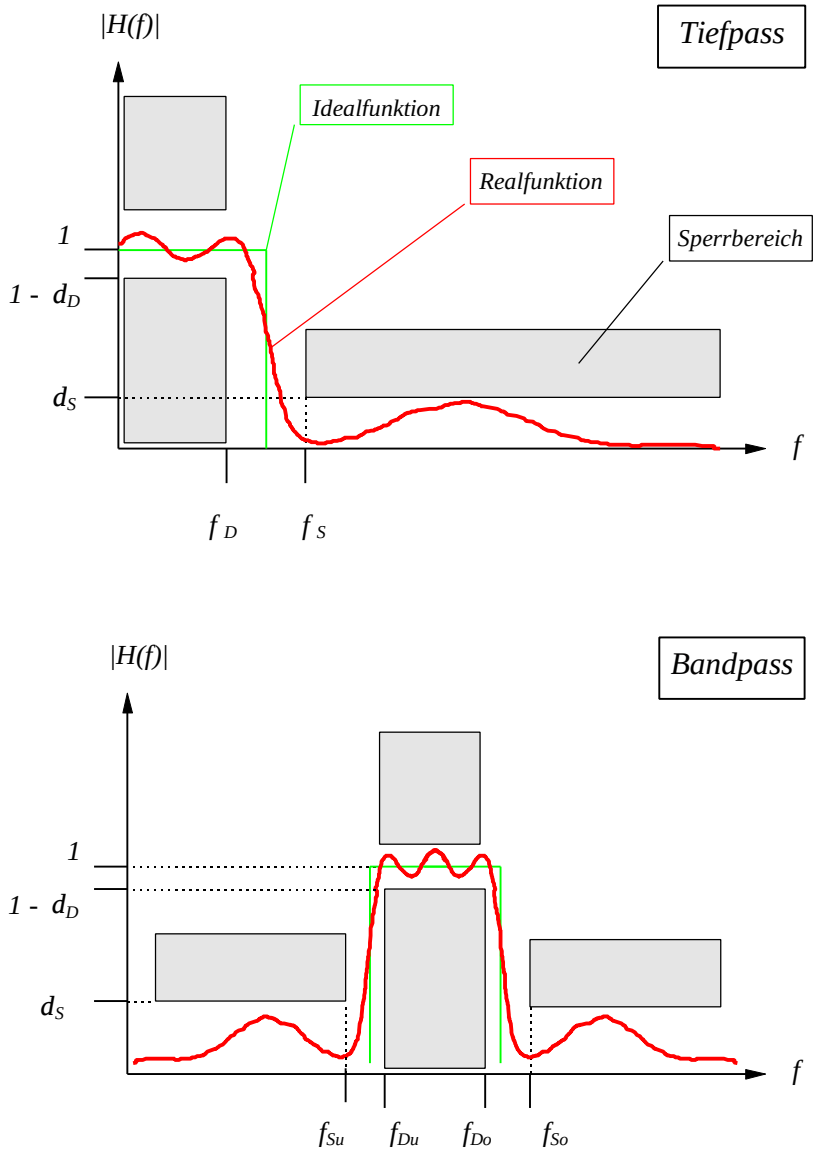


Bild 3.6-9 Toleranzbänder beim Entwurf von Filtern

4 Rechnergestützte Versuche

4.1 Grundsätzliche Bemerkungen

Rechnergestützte Versuche sind Untersuchungen an Meßobjekten, bei denen der Einsatz eines oder mehrerer Rechner ein wesentliches Element ist. Wie in Bild 1 schematisch dargestellt ist, reichen seine Aufgaben von der simplen Meßwerterfassung bis hin zur Steuerung eines kompletten Versuchsablaufs. Je mehr sich dabei der Aufgabenbereich von der „Unterstützung“ bei Messungen zur programmierten „Ablaufsteuerung“ verschiebt, desto sorgfältiger ist der Rechnereinsatz zu planen und desto aufwendiger gestalten sich die Vorbereitungsarbeiten für einen fehlerfreien Gesamtablauf.

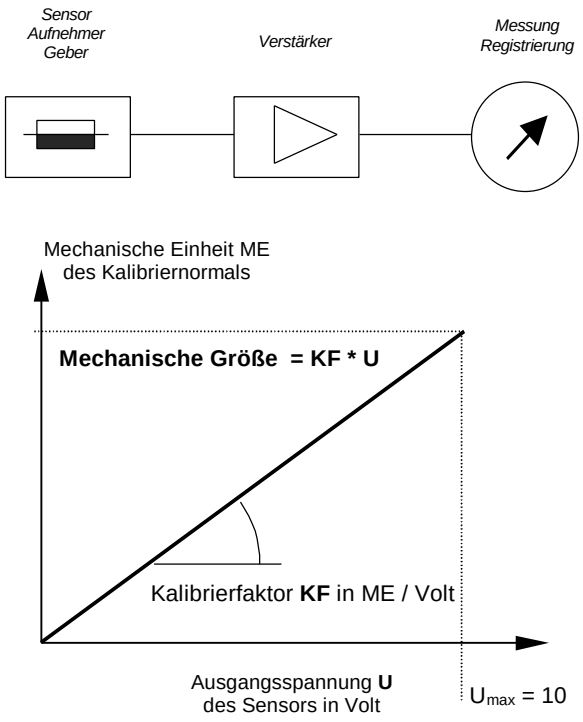
Bei einfachen Messungen von mechanischen Größen eines Meßobjekts und ihrer zeitlichen Veränderung, arbeitet der Rechner registrierend wie ein Oszilloskop und der Sicherheit der Meßwerte wird normalerweise keine besondere Beachtung geschenkt. Diese Messungen können bei Bedarf mehrmals wiederholt werden, unter anderem zu dem Zweck, durch Veränderung der Meßgeräteeinstellung die Qualität der Ergebnisse zu verbessern. Die gleichzeitige Messung vieler Sensoren oder die nachträgliche Anwendung verschiedener Analysemethoden verlangen die Speicherung von Meßwerten und eine hohe Datensicherheit. Letztere bezieht sich sowohl auf die Sicherheit in der Wahl von Geräteeinstellungen und Abtastparametern, als auch auf das Speichermedium selbst. Daten nicht wiederholbarer Versuche müssen redundant gespeichert und sehr sorgfältig dokumentiert werden. Dazu gehören alle für den Versuch relevanten Parameter, die für den Erfolg späterer Auswertungen maßgebend sind. Wer jemals die Aufgabe hatte, gespeicherte Datensätze erneut auszuwerten, der kennt die Schwierigkeiten, beispielsweise die entscheidenden Kalibrierfaktoren zu finden. Mit Rechnerunterstützung sollte es zwar kein Problem sein, die notwendigen Werte zu speichern. Nur wann welche Daten zu messen oder einzugeben sind, in welchem Verzeichnis und in welcher Datei sie abgelegt werden, das ist vorrangig ein Organisationsproblem, das der Versuchsingenieur bei der Versuchsplanung zu lösen hat. Selbstverständlich kann hierbei die Rechnerunterstützung von Vorteil sein, insbesondere wenn Einstellungen von Sensoren und Verstärkern über Standardschnittstellen vom Rechner aus möglich sind. Moderne Geräte besitzen diese technischen Einrichtungen und bieten somit den Vorteil, daß mit Rechnervorgabe der Einstellwerte ihre Speicherung erfolgt ist.

Versuche zu steuern bedeutet im einfachsten Fall die Vorgabe einer Zeitreihe für einen Aktor. In der nächsten, anspruchsvolleren Stufe ist dann zu kontrollieren, welches die „Istwerte“ des Aktors als Vorgabe der „Sollwerte“ sind, die im allgemeinen unterschiedlich ausfallen. Zur Erzielung der höchstmöglichen Wiedergabetreue muß das ganze System mit Objekt, Aufnehmern, Rechner, Aktoren wie ein Regler arbeiten, dessen Programmierung Kenntnisse der Regelungstechnik verlangt. Für (digitale) Regelungsaufgaben sind besonders leistungsfähige Rechner erforderlich, zum Beispiel Signalprozessoren mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit. Befindet sich in der Kette von Instrumenten bereits ein analoger Regler, etwa zur Kraftregelung von Werkstoffprüfmaschinen, dann genügt es, mit dem Rechner eine überlagerte Regelung der Sollwertvorgabe zu verwirklichen, die auch mit weniger schnellen Rechnern gelingt.

Bei Untersuchungen großer und teuerer Meßobjekte, die auf keinen Fall vorzeitig zu Bruch gehen dürfen, treten für die Versuchssteuerung ganz andere Gesichtspunkte in den Vordergrund. Hier muß der Rechner nicht nur Meßwerte erfassen und Aktoren steuern, sondern zusätzliche Überwachungsaufgaben übernehmen, damit Beschädigungen oder gar Zerstörung des Objekts durch nicht programmgemäße Ereignisse verhindert werden. Das heißt, in Abhängigkeit von den anfallenden Meßwerten ist dem Rechner die Entscheidung zu übertragen, wie auf eine außergewöhnliche Situation reagiert werden soll: Ignorieren, vorsichtige Unterbrechung des Versuchsablaufs oder schnellstmögliche Entlastung des Objekts. Die Ursachen für derartige Situationen sind bei großen Versuchsaufbauten vielfältig, aber in ihrer Art immer wieder gleich: Übersteuerung von Verstärkern, Kabelbruch an Sensoren und Aktoren, Überhitzung von Lagern, Resonanzerscheinungen, Ermüdungsversagen der Belastungsvorrichtung oder ihrer Einzelteile. Derartige Möglichkeiten neben den meßtechnischen Anforderungen bei der Gestaltung des Steuerprogramms zu berücksichtigen, bedarf umfangreicher Kenntnisse und Erfahrungen in der Versuchstechnik. Da sie in einer Einführungsvorlesung nicht vermittelt werden können, beschränkt sich dieser Abschnitt auf die Beschreibung typischer Aufgaben, die auch bei komplexen Versuchen vorkommen und Bestandteil der Gesamtaufgabe sind.

4.2 Kalibrierung

„Elektrisches Messen mechanischer Größen“ ist keine modische Formulierung, sondern eine zwingende Voraussetzung für Rechnereinsatz und Signalanalyse. Wie in der Vorlesung „Versuchstechnik“ dargelegt, wandeln Sensoren die zu messende mechanische Größe in eine proportionale elektrische Spannung um.



Diese Spannung läßt sich dann mit A/D-Wandlern digital erfassen und speichern. Ihre Einheit ist Volt oder eine der analogen Spannung proportionale digitale Einheit (DE), die sich aus der Bit-Zahl des Wandlers ergibt. Die Zuordnung zwischen mechanischer Größe und ihrem elektrischen Äquivalent erfolgt mit Hilfe von Kalibrierfaktoren. Den Vorgang, sie zu bestimmen, nennt man Kalibrierung

Nebenstehendes Bild zeigt eine ideale Kalibrierung, die technische Geräte nur unvollkommen erreichen. So bestehen Abweichungen von der Linearität oder die Kalibrierkurve verläuft nicht durch den Nullpunkt, so daß bei der Umrechnung der Nullpunktsabstand (offset) mit zu berücksichtigen ist. Falls die tatsächliche Kalibrierkurve nicht linear ist und eine Linearisierung zu große Fehler verursachen würde, muß die Ermittlung der gesuchten mechanischen Einheit anhand von (angenährten) Polynomfunktionen oder diskreter Wertetabellen erfolgen.

Der Kalibrierfaktor einer ganzen Meßkette (z.B. Sensor und Verstärker) ist das Produkt der Kalibrierfaktoren der einzelnen Elemente. Entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz wirken sich deren Unsicherheiten auf die Unsicherheit der ganzen Kette aus. Es liegt also nahe, nicht die Kalibrierfaktoren der Meßkettenglieder, sondern den gemeinsamen Kalibrierfaktor der ganzen Kette zu bestimmen. Nach Aufbau der Kette und Anschluß an den Rechner benötigt man lediglich einen (genau kalibrierten) Referenzgeber, mit dessen Hilfe sich die Gesamtkalibrierung (Sensor, Verstärker, Filter, Signalanpassung, A/D-Wandler) auf einfache Weise durchführen läßt. Im Hinblick auf die vielen einstellbaren Parameter in einer derartigen Kette, die teilweise manuell vorgenommen und nicht zwangsweise im Rechner registriert werden, empfiehlt sich vor jedem Versuch eine derartige Kalibrierung. Praktisch geht man bei einer Kalibrierung so vor, daß man den Arbeitsbereich des Sensors in 10 Teileschritte unterteilt und an diesen Positionen seine Ausgangsspannung zusammen mit der Anzeige (oder Ausgangsspannung) des Referenzgebers registriert. Die Tabelle der Kalibrierwerte unterzieht man anschließend einer linearen Regression (siehe Versuchstechnik 5.2) und bewertet anhand von Korrelationskoeffizient (Bestimmtheitsmaß) und Vertrauensbereiche, ob zwischen Ausgangsspannung und mechanischer Größe des Sensors ein linearer Zusammenhang besteht.

4.3 Typische Messaufgaben

Die Aufgabe, meßgrößenproportionale elektrische Spannungen von Sensoren zu messen, übernimmt der Analog-Digital-Wandler (ADC, A/D-Wandler), das zentrale Gerät in der Meßperipherie eines Rechners. Der Einzelschritt einer Messung ist die Umsetzung eines Momentanwertes der Spannung in einen Zahlenwert. Je nach Zielsetzung der Meßaufgabe und in Abhängigkeit vom Störanteil im Signal wird dieser Einzelschritt mehrfach wiederholt. Das Meßergebnis ist dann nicht mehr ein einzelner Zahlenwert, sondern eine Zeitreihe, also eine Zahlentabelle mit Einzelwerten, die im allgemeinen einen konstanten zeitlichen Abstand von einander besitzen.

Eine typische Meßaufgabe beginnt damit, den Ausgang der Sensor-Verstärker-Kombination mit dem Eingang der Meßwerterfassungskarte zu verbinden und die elektrische Kompatibilität, wie Spannungsbereiche und Gerätewiderstände, sicherzustellen. Danach muß der A/D-Wandler mit Einstellparametern, beispielsweise Abtastfrequenz und Meßdauer, versorgt werden, die eine der Aufgabe angepaßte Datenerfassung ermöglichen. Der

Start der eigentlichen Messung erfolgt durch den Benutzer, der den Zeitpunkt entsprechend dem Versuchsverlauf wählt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, mit einer Triggerung den Meßbeginn vom Verlauf des Versuches abhängig zu machen und somit nur die für das Versuchsziel wichtigen Daten zu erfassen. In gleicher Weise kann die Dauer oder das Ende der Messung von Ereignissen

Versuch beobachten	Messung = Meßwerte erfassen (A/D) Selektive oder umfassende Anzeige Datenreduktion (Mittelung) Zwischenspeicherung
Versuch beenden	Datenspeicherung
Kontrolle gespeicherter Meßwerte	Darstellung: Oszilloskop-Funktion, Y/t-Grafik Markierung: Momentanwerte im Diagramm an Cursor-Position(en)

Wie im Schema für Versuchsabläufe dargelegt ist, folgen der Meßwerterfassung weitere Aufgaben, die mit dem Rechner, also in der Kombination von Hard- und Software, bearbeitet werden. Dazu zählen Visualisierung und Speicherung, sowie die sich anschließenden Analysen und Meßwertverarbeitung. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um Erfassung und Anzeige eines Wertes, ähnlich der Vorgehensweise bei der Spannungsmessung mit einem Voltmeter. Da aber die Signale von Sensoren im allgemeinen keine statischen Größen sind, vielmehr zeitabhängigen Änderungen unterliegen, werden grundsätzlich Meßreihen aufgenommen. Diese bilden erstens die Grundlagen für den Ausgleich stochastischer Störungen im Signal und sie sind zweitens erforderlich, um dynamische Eigenschaften des Meßobjektes zu analysieren.

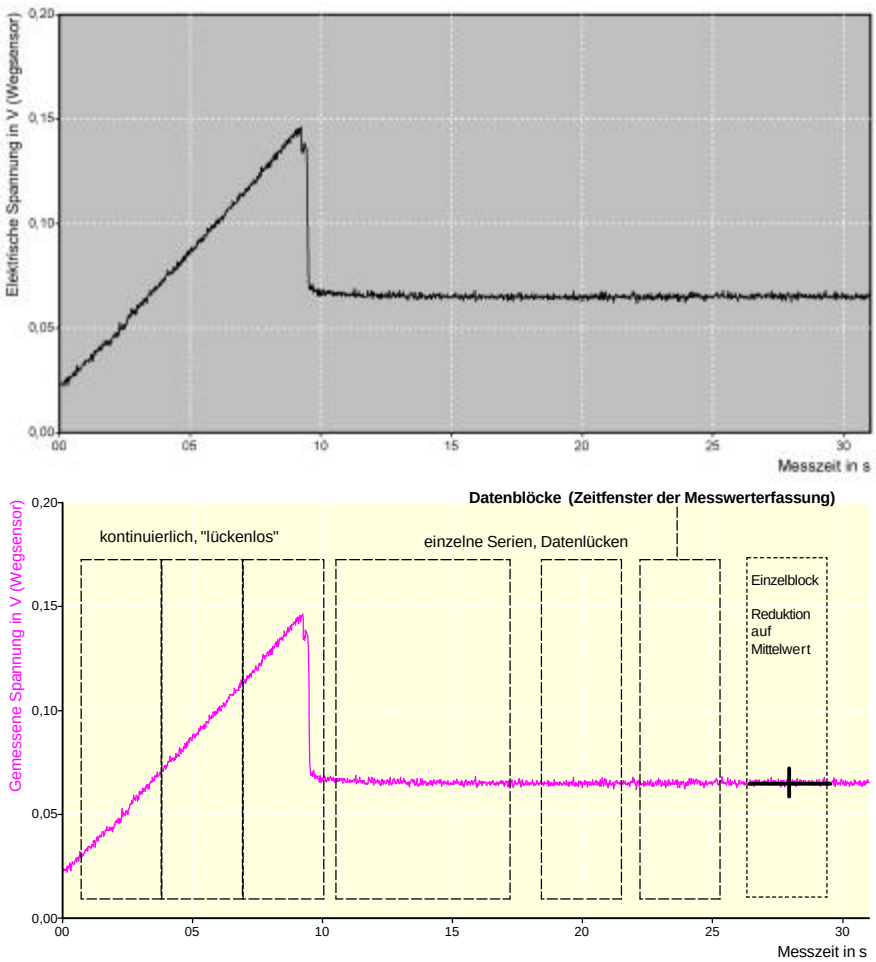
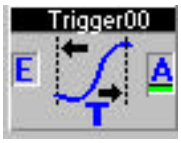
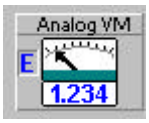
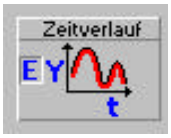
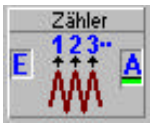
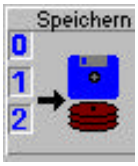


Bild 4.3-1 Beispiel für eine zu messende Spannung (Wegsensor)

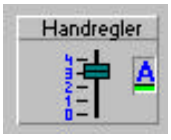
4.4 Elemente und Funktionseinheiten rechnergesteuerter Versuche

Funktionseinheiten von rechnergestützten Messungen

Funktion, Symbol	Aufgabe, Einstellungen	Erläuterungen
A/D Wandler 	**Messung** Anzahl der Meßkanäle wählbar (1 ... 16) A/D Einstellwerte: Abtastfrequenz Blockgröße Abtastmodus Meßbereich Skalierfunktion Triggermodus	*Abtastfrequenz* und *Blockgröße* bestimmen die Meßdauer. Der *Abtastmodus* legt fest, ob einzelne Blöcke erfaßt werden, zwischen denen der Datenstrom unterbrochen sein kann, oder ob bei kontinuierlicher Übertragung die Blöcke nahtlos an einander anschließen. Mit dem *Meßbereich* wählt den Spannungsbereich, der größer sein muß als die Schwankungsbreite des Signals während der Messung. Die *Skalierfunktion* eröffnet die Möglichkeit, die gemessenen Spannungen sofort mit dem Kalibrierfaktor zu multiplizieren und sie in den mechanischen Einheiten des Sensors anzuzeigen und zu speichern. Der *Triggermodus* legt fest, ob und in welcher Weise der Start des A/D-Wandlers vom Signalinhalt gesteuert werden soll. Beispiel Pegelüberschreitung: Erst wenn die Spannung eine voreingestellte Grenze (Pegel) überschreitet beginnt der A/D-Wandler mit seiner Arbeit.
Trigger 	**Beeinflussung der Messung** Anzahl der Kanäle wählbar (1 ... 16) Triggerarten Triggermodus Triggerbedingungen	*Triggerart* und *Trigger*modus bestimmen, welche Merkmale in einem oder mehreren Kanälen die Datenströme beeinflussen sollen. Sofern die Triggermöglichkeit über den Start der Messung im A/D Wandlers selbst nicht aktiviert ist, kann mit diesem Modul Beginn und Ende einer Messung, (genau genommen die Übernahme von Meßwerten vom A/D Wandler) definiert werden. Dazu muß der Wandler in einem kontinuierlichen Modus arbeiten, da sonst keine Prüfung der Triggerbedingungen möglich ist.
Anzeige 	**Visualisierung** Einzelwerte: digital analog	*Visualisierung* bezeichnet die Klasse von Hilfsmittel, um gemessene werte anzuzeigen. Für Einzelwerte gibt es wie bei elektrischen Meßinstrumenten drei Möglichkeiten: Zahlenwert (digital) Zeigerausschlag (analog, proportional zum Winkel) Bargraf (analog, proportional zur Länge)
Anzeige 	**Liste** Kanalzahl Ausgabeformat Speichertiefe	Die Reihenfolge der abgetasteten Werte einer Blockmessung läßt sich mit einer Liste darstellen. Sie wird zur Fehlehrsuche gebraucht oder zur Ermittlung von geeigneten Schwellwerten für eine Triggerung
Anzeige 	**Diagramm** Zeitreihen Zeitfenster Datenblöcke	Zur Veranschaulichung des Zeitverlaufs eines Signals benutzt man eine Oszilloskop-Funktion: Die Meßwerte Y werden als Funktion der Zeit t dargestellt. Diese Darstellung soll während der Messung oder kurz danach einen Eindruck bezüglich Signalqualität (Stö-

		rungsanteil) und Vollständigkeit der Daten vermitteln.
Funktion, Symbol	Aufgabe, Einstellungen	Erläuterungen
Datenreduktion	**Mittelwertbildung** Arithmetisch Quadratisch blockweise oder hochlaufend Zahl zu mittelnder Werte	Blockmessungen können dazu genutzt werden, um stochastische Störanteile über eine Mittelwertbildung zu eliminieren. Das bedeutet eine Datenreduktion, denn als Ergebnis dieser Operation bleibt von N gemessenen werten nur der Mittelwert (eventuell die zugehörige Standardabweichung) übrig
Datenreduktion 	**Zähler** arithmetisch quadratisch blockleise oder hochlaufend Zahl zu mittelnder Werte	Durchführung diverse Zählfunktionen wie Anzahl Blökke, Anzahl Meßwerte, Flanken und Zeiten. Für jeden Datenblock wird ein Ergebniswert erzeugt. Das Ergebnis kann sich auf einen Datenblock beziehen oder – Modus hochlaufend- auf alle Daten seit Beginn der Messung
Datenreduktion	**Minima und/oder Maxima** Funktionsart Ausgabemodus - Funktionswert - TTL-Peak	Erfassung von Minima und/oder Maxima im Datenstrom, Ausgabe der gefundenen Werte. *Funktionswert*: Minima und/oder Maxima als Ausgabewerte weitergegeben. *TTL-Peak:* TTL-High-Signal (+5.0 V) anstelle eines Maximums und (oder) Minimums ausgegeben
Speicherung 	**Meßwerte speichern** Kanalzahl wählbar Dateiname Dateiformat Kommentar	Daten auf Diskette oder Festplatte speichern *Dateiformat:* Auswahl eines Dateiformates, das der für weitere Datenanalysen gewählten Software am besten entspricht *Kommentar:* Detaillierte Kennzeichnung der Daten und Eingabe wichtiger Parameter für spätere Analysen

Elemente von rechnergestützten Steuerungen

Funktion, Symbol	Aufgabe, Einstellungen	Erläuterungen
D/A Wandler	**Ausgabe** Anzahl der Ausgabekanäle wählbar (1 ... 4) D/A Einstellwerte: Ausgang bei Stopp der Messung	Der D/A Wandlers wird benötigt, um Einstellwerte oder Signale an Aktoren auszugeben. Damit wird eine definierte Belastung für ein Meßobjekt erzeugt, dessen Reaktionen mittels Sensoren und A/D Wandler erfaßt werden. Die Arbeitsweise der A/D – D/A Kombination hängt von den Spezifikationen der verwendeten Hardware ab. Besonders wichtig ist die Einstellung D/A-Kanälen zum Zeitpunkt des Programm-Stopps: Bei unkontrollierten Sprüngen der Ausgabespannung an die Aktoren können diese das Versuchsobjekt beschädigen oder zerstören!
Handregler 	**Erzeugung von Ausgabewerten** Minimal/Maximalwert Auflösung	Erzeugung (grafisch) einstellbarer Werte zur Ausgabe über D/A Wandler *Minimal/Maximalwert :* Festlegung des oberen und unteren Einstellbereichs *Auflösung:* Anzahl der Einzelschritte für die Unterteilung des Minima/Maximal-Bereichs

		.
Funktion, Symbol	Aufgabe, Einstellungen	Erläuterungen
Zeitgeber 	**Erzeugung eines Zeittaktes** (TTL-konforme Daten) Dauer Umschaltzeit	TTL-High => Zahlenwert 5 [Volt], TTL-Low => Zahlenwert 0. Die Zeiten für die Gesamtdauer eines Zyklus‘ wie auch die Zeiten für die Abschnitte (Tastverhältnis) sind separat einstellbar
Generator 	**Erzeugung von Signalen** Kurvenform Signalfrequenz Amplitude Offset (Gleichanteil)	*Kurvenform:* Sinus, Rechteck, Dreieck, Sägezahn, Impuls, Rauschen, Konstante *Signalfrequenz:* Signalperioden pro Sekunde. Die Auflösung, also die Anzahl der Schritte pro Periode, ergibt sich aus dem Verhältnis der Abtastrate (Ausgabefrequenz) und gewählter Signalfrequenz

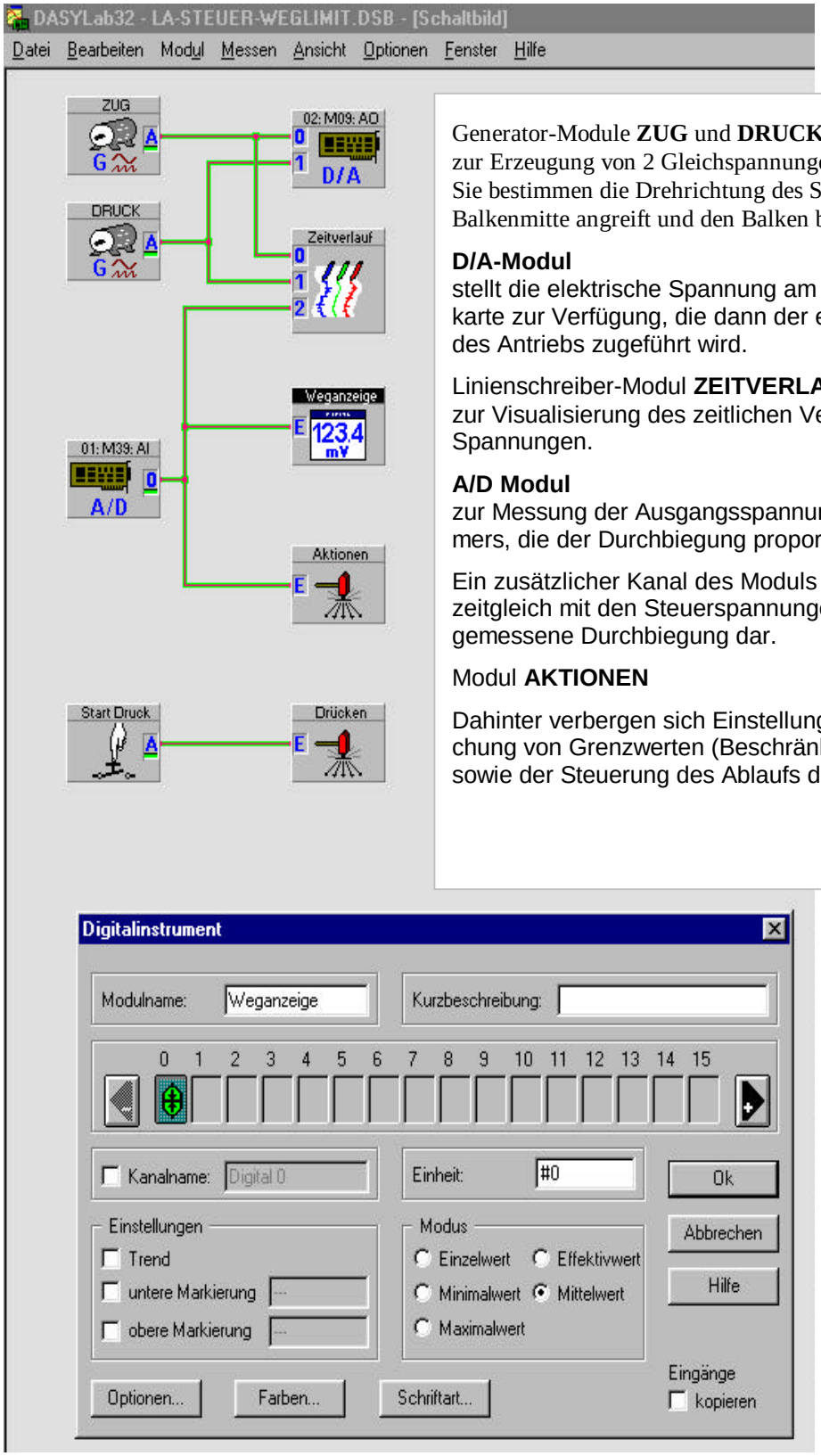
Die in der zweiten Spalte angeführten Aufgaben sind Teil der meisten Versuche und ganz allgemein gültig. Werden die tabellierten Elemente und Funktionseinheiten logisch miteinander verbunden, ergibt sich daraus ein Programm des Versuchsverlaufs und somit ein Werkzeug zur Bearbeitung unterschiedlichster Versuchsaufgaben. Die Einzelheiten derartiger Ablaufsteuerungen und Meßaufgaben bestimmen sich jedoch aus der eingesetzten Hard- und Software. Für das Ziel dieser Vorlesung, praktische Erfahrungen mit rechnergestützten Versuchen zu gewinnen, wurde eine gängige Konfiguration ausgewählt, auf die sich sowohl die gezeigten Symbole als auch die weiteren Beispiele beziehen:

- PC mit Betriebssystem Windows (W95, W2000) und Treiber für Einsteckkarte
- Einsteckkarte Sorcus Modular 486 (Prozessor on board, A/D- und D/A-Module)
- DASYLab

Zwei wesentliche Gründe für diese Auswahl sind, daß die Bedienung und die Gestaltung einfacher Aufgaben nur kurze Einarbeitungszeiten erfordert und zudem ein gutes Kosten/Nutzenverhältnis besteht. Im Vergleich mit anderen marktgängigen Produkten ist die Vielfalt der Module und Funktionen zwar eingeschränkt, doch die wesentlichen Merkmale dieser Versuchstechnik und des Rechnereinsatzes lassen sich damit gut demonstrieren.

In dieser Umgebung kann die Ablaufsteuerung eines Versuchs mit grafischen Hilfsmitteln einfach und schnell gestaltet werden, indem man die für eine Teilaufgabe passenden Moduln auswählt, ihre Parameter setzt und durch Linien zu Schaltbildern verbindet (Bild 4.4-2). Das Erstellen eines Schaltbildes entspricht der Programmierung des Versuchsablaufs. Die Aktivierung des Schaltbildes, das heißt der Lauf des Programms, erfolgt durch Mausklick auf ein Startsymbol oder per Tastendruck. Mit der Betätigung eines entsprechenden Symbols oder durch ereignisabhängige Entscheidungen, die mit einem oder mehreren Datenströmen verbunden sind, wird der Programmlauf beendet.

Die Analyse gemessener Daten verläuft prinzipiell nach dem gleichen Schema: Der Ablauf wird mit Hilfe entsprechender Module und Verbindungslinien als Schaltbild zusammengestellt und dann zur Ausführung gebracht. Soweit das Potential von Rechner, Hardware und Software ausreicht, kann die Analyse schon während der Messwerterfassung erfolgen, beispielsweise die FFT-Analyse von Signalen und ihre Darstellung als Wasserfalldiagramm. Sind die Anforderungen zu hoch, dann bleibt nur die nachträgliche Analyse der Daten, die auf die Festplatte gespeichert wurden.



Generator-Module **ZUG** und **DRUCK**
zur Erzeugung von 2 Gleichspannungen
Sie bestimmen die Drehrichtung des Spindelantriebs, der in Balkenmitte angreift und den Balken be- oder entlastet.

D/A-Modul
stellt die elektrische Spannung am Ausgang der Einsteckkarte zur Verfügung, die dann der elektrischen Schaltung des Antriebs zugeführt wird.

Linienschreiber-Modul **ZEITVERLAUF**
zur Visualisierung des zeitlichen Verlaufs der erzeugten Spannungen.

A/D Modul
zur Messung der Ausgangsspannung eines Wegaufnehmers, die der Durchbiegung proportional ist.

Ein zusätzlicher Kanal des Moduls ZEITVERLAUF stellt zeitgleich mit den Steuerspannungen für den Aktor die gemessene Durchbiegung dar.

Modul **AKTIONEN**

Dahinter verbergen sich Einstellungen, die der Überwachung von Grenzwerten (Beschränkung der Durchbiegung) sowie der Steuerung des Ablaufs dienen

Einstellfenster für Digitalinstrumenten-Modul

Jedes Modul wird mit einem Satz von Parametern für seine Aufgabe eingestellt. Das abgebildete Beispiel zeigt, wie die Eingabe der Parameter auf grafischem und/oder numerischem Weg erfolgt

Bild 4.4-2 Beispiel eines DASYLab-Schaltbildes:

Steuerung eines elektromechanischen Aktors
für die mittige Belastung eines Balkens auf zwei Stützen
und Messung der Durchbiegung in Abhängigkeit von der Kraft